



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**RODRIGO SOARES AMBRÓSIO DE ARAUJO**

**VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PORTÁTIL PARA  
QUANTIFICAR O TEOR DE ÁGUA FOLIAR POR MÉTODO  
ÓPTICO**

**LAVRAS – MG  
2018**

**RODRIGO SOARES AMBRÓSIO DE ARAUJO**

**VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PORTÁTIL PARA QUANTIFICAR O TEOR DE ÁGUA  
FOLIAR POR MÉTODO ÓPTICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Mestre.

**Prof. Dr. Roberto Alves Braga Junior**  
**Orientador**

**Prof(a). Dr(a). Juliana Vilela Lourençoni Botega**  
**Coorientadora**

**Prof(a). Dr(a). Leila Aparecida Salles Pio**  
**Coorientadora**

**Dr(a). Ester Alice Ferreira**  
**Coorientadora**

**LAVRAS – MG**  
**2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Araujo, Rodrigo Soares Ambrósio de.

Validação de um protótipo portátil para quantificar o teor de  
água foliar por método óptico / Rodrigo Soares Ambrósio de  
Araujo. - 2018.

38 p. : il.

Orientador(a): Roberto Alves Braga Junior.

Coorientador(a): Juliana Vilela Lourençoni Botega, Leila  
Aparecida Salles Pio, Ester Alice Ferreira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Biospeckle laser. 2. Atividade de água. 3. Automação. I.  
Braga Junior, Roberto Alves. II. Botega, Juliana Vilela Lourençoni.  
III. Pio, Leila Aparecida Salles. IV. Ferreira, Ester Alice. V. Título.

**RODRIGO SOARES AMBRÓSIO DE ARAUJO**

**VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PORTÁTIL PARA QUANTIFICAR O TEOR DE  
ÁGUA FOLIAR POR MÉTODO ÓPTICO**

**VALIDATION OF A PORTABLE PROTOTYPE TO QUANTIFY FOLIAR WATER  
CONTENT BY OPTICAL METHOD**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 18 de junho de 2018

Dra. Ester Alice Ferreira  
Profa. Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega  
Prof. Dr. Pedro Maranhã Peche

EPAMIG  
CEFET/MG  
UFLA

Prof. Dr. Roberto Alves Braga Junior  
**Orientador**

**LAVRAS – MG  
2018**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar por toda a minha trajetória e tornar possível mais essa etapa.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização do mestrado e ao Programa de Pós-Graduação, que me proporcionaram todo o apoio de ensino, juntamente com os professores e técnicos, em especial à secretária Hellen, pela paciência, gentileza e todo auxílio.

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro e a bolsa de estudo concedida.

Ao Prof. Roberto, pela orientação, pela paciência em me passar todos os ensinamentos, por acreditar no meu trabalho e pela amizade.

Aos meus pais, por toda a minha vida tiveram dedicação comigo me mostrando os valores éticos com amor, carinho e paciência, mesmo nos momentos difíceis, sendo meu porto seguro, não mediram esforços para eu chegar nessa conquista. Aos meus irmãos pelo companheirismo, motivação e confiança nesses dois anos, em especial o Daniel que foi comigo a campo.

Aos meus amigos Jacqueline, Paula, Wellington, Pietros, Mariana e Bianca pelas risadas, companheirismo e histórias vivenciados juntos.

À Elisangela que se desdobrou para me ajudar nas análises em campo, por ser parte fundamental desses resultados.

E a todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para esta realização.

Deixo a vocês o meu muitíssimo obrigado!

## RESUMO

A falta de água tem se tornado um problema grave nos tempos modernos, recurso este cada vez mais escasso caso não haja uma melhor gestão. Cada cultura necessita de uma quantidade específica de água para melhor desenvolvimento e rendimento produtivo. Diante desse aspecto é impossível não se estudar a melhor forma de quantificar possíveis indicadores para o excesso ou déficit hídrico, melhorando assim o manejo. Uma alternativa para a otimização dos recursos hídricos na agricultura de forma racional é a obtenção do valor do nível de hidratação das plantas. De forma geral, o nível de hidratação das plantas pode ser estimado por meio de sintomas visuais, ou medido quantitativamente em termos de conteúdo ou estado de energia da água na planta. Portanto, as condições hídricas nos tecidos das plantas podem ser avaliadas tanto pelo teor como pela energia livre de água. O teor de água é expresso em teor relativo e em déficit de saturação, enquanto a energia livre é expressa em potencial total de água na planta. Algumas técnicas visam a medição do potencial hídrico foliar, o que permite, entre outros, o controle da necessidade e da quantidade de irrigação. Entretanto, a maioria das técnicas existentes para determinação do potencial de água envolvem determinações da pressão de vapor de água em equilíbrio, ou o uso de câmara de pressão; possuindo limitações no que se refere ao elevado número de amostragem e no emprego de análises destrutivas, assim como a realização de medições indiretas no solo. Além disso, as técnicas para a medição do teor de água na folha são métodos indiretos, como a temperatura das folhas. As medições do potencial e teor de água na folha, necessitam de alguns cuidados, a fim de que os dados observados reflitam o verdadeiro estado hídrico da planta. Objetivou-se validar um dispositivo portátil de baixo custo para análise atividade de água na folha em campo, obtendo o teor de água na folha da planta. O método utiliza o fenômeno de *biospeckle laser* (não destrutivo) e se divide em várias etapas, desde a iluminação e a captura das imagens das folhas pelo protótipo até as análises dessas imagens por métodos estatísticos.

Palavras chaves: *Biospeckle laser*; Atividade de água; Automação.

## ABSTRACT

Lack of water has become a serious problem in modern times, an increasingly scarce resource if there is no better management. Each crop needs a specific amount of water for better development and yield. Considering this aspect it is very important to study the best way of quantifying possible indicators for water surplus or deficit, thus improving water management. An alternative for optimize water resources in agriculture in a rational way is to obtain the value of the plants hydration level. In general, plant hydration level can be estimated by visual symptoms or measured quantitatively in terms of water content or plant energy status. Therefore, water conditions in the plant tissues can be evaluated both by the content as the water free energy. The water content is expressed in relative content and saturation deficit while free energy is expressed in total water potential in the plant. Some techniques aim the measurement of leaf water potential, which allows, among others, control the need and quantity of irrigation. However, most existing techniques for determining water potential involve water vapor pressure determinations in equilibrium or use pressure camera; with limitations on the high sampling number and the destructive analysis, as well as indirect measurements in the soil. Besides, the techniques for measuring leaf water content are indirect methods, such as leaf temperature. The measurements of potential and water leaf content need some care in order to observed if data reflect the true plant water status. The aim of this study was to validate a low cost portable device to analyze water activity in the field leaf, obtaining the water content in the plant leaf. The method uses the *biospeckle laser* phenomena (non destructive) and is divided in several stages, from the illumination and the capture of leaves images by the prototype to the images analysis by statistical methods.

Keywords: *Biospeckle laser*; Water activity; Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Modelo do protótipo de identificação do conteúdo de água e os níveis de clorofila.....	13
Figura 1 -	Folha referente ao grupo 1, com um ponto de análise.....	14
Figura 2 -	Folha referente ao grupo 2, com três pontos de análise.....	14
Figura 3 -	Ponto escolhido para obtenção dos valores do AVD Renan e do Momento de Inércia.....	15
Figura 4 -	Atividade de água na folha do grupo 1.....	15
Figura 5 -	Atividade de água na folha do grupo 2.....	16
Figura 7 -	Plantas dentro da estufa na realização do experimento.....	17
Figura 8 -	Plantas após a saturação para se chegar na capacidade de campo.....	18
Figura 9 -	Dados da temperatura e umidade relativa no decorrer dos dias de experimento dentro da estufa.....	19
Figura 10 -	Curvas da umidade do solo em cada um dos vasos do experimento no decorrer do tempo.....	22
Figura 11 -	Diminuição da atividade de água de acordo com a análise do Momento de Inércia.....	24
Figura 11 -	Diminuição da atividade de água de acordo com a análise do AVD Renan.....	25
Figura 11 -	Cargas fatoriais dos tratamentos sem as plantas.....	27
Figura 11 -	Cargas fatoriais dos tratamentos com as plantas.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Umidade na capacidade de campo em função do parâmetro m ajustado pelo modelo de van Genunchten (1980).....	21
Tabela 2 -	Tabela referente aos dois primeiros fatores, sem rotação.....	26

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
2 OBJETIVOS .....	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivo específico.....	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
3.1 Relações hídricas.....	13
3.2 <i>Speckle laser dinâmico</i> .....	14
3.3 Métodos de análise do <i>Speckle laser dinâmico</i> .....	15
3.3.1 Momento de Inércia .....	15
3.3.2 Diferença dos Valores Absolutos .....	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	18
4.1 Calibração e avaliação do conjunto protótipo .....	18
4.1.1 Obtenção das imagens por <i>Biospeckle laser</i> na calibração .....	18
4.1.2 Processamento das imagens e avaliação dos resultados da calibração.....	20
4.2 Teste do protótipo em campo .....	22
4.2.1 Características das condições climáticas na estufa.....	24
4.2.1 Obtenção das imagens por <i>Biospeckle laser</i> .....	25
4.2.1.1 Processamento das imagens .....	25
4.2.2 Obtenção dos dados do analisador de gás no infravermelho (IRGA) .....	25
4.2.3 Obtenção dados dos tensiômetros .....	26
4.3 Obtenção dos dados do teor relativo de água (TRA) .....	27
4.4 Correlacionamento dos dados do <i>biospeckle laser</i> , IRGA e TRA .....	27
5 RESULTADOS E DISCURSSÃO.....	28
5.1 Perda de água pelo solo usando os tensiômetros.....	28
5.3 Análise da diminuição da atividade de água na folha dos citros usando o método BSL .....	29
5.4 Comparação entre as metodologias de BSL, IRGA e TRA. ....	32
6 CONCLUSÃO .....	35
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	36

## 1 INTRODUÇÃO

São fundamentais os estudos das relações hídricas nas plantas e das interações causadas pelo seu déficit hídrico sobre os processos fisiológicos, uma vez que este é um dos fatores que interfere diretamente em uma boa produtividade e qualidade dos frutos; e em um bom crescimento vegetal.

O déficit hídrico acontece sempre que a transpiração ultrapassa a absorção. Sendo que o teor de água é expresso em teor relativo e em déficit de saturação e a energia livre é expressa em potencial total de água na planta.

Visando essa importância da medição de ambos os processos, ambos têm os seus métodos para análise, onde os métodos tradicionais para a quantificação de potencial hídrico implicam em processos destrutivos e dispendiosos, sendo recomendável a busca por métodos não destrutivos, como por exemplo os métodos ópticos. Já as técnicas para a medição do teor de água na folha são métodos indiretos, como a temperatura das folhas.

O *speckle laser*, é um método óptico não destrutivo, que possibilita à medição e a análise por meio de processamento digital de imagens e tratamentos estatísticos de dados, levando a quantificação de atividade de água na folha da planta. Todavia, o *speckle laser dinâmico* ou *Biospeckle laser* (BSL), ainda está limitado aos laboratórios de óptica.

Este trabalho teve o objetivo de validar um dispositivo portátil, usando o método de *Biospeckle laser*, que possa representar uma alternativa viável para a quantificação do teor da atividade de água nas folhas de citros, em campo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Validar um protótipo portátil para uso do *biospeckle laser*, como uma técnica não destrutiva e de baixo custo, na medição e avaliação da atividade de água na folha de citros, em campo.

### **2.2 Objetivo específico**

- ✓ Avaliar a eficiência e autonomia do conjunto: laser, fonte de energia, câmera e computador em campo.
- ✓ Determinar e avaliar a eficiência do protótipo construído para a medição de atividade de água na folha de citros em campo;
- ✓ Validar a técnica proposta comparando com os métodos de teor relativo de água (TRA), IRGA e com uso de tensiômetros em mudas de citros.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Relações hídricas

Um bom manejo da água na agricultura exige um conhecimento das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA), pois são estruturas diferentes entre si, com diversas formas de interação com a água.

A água tem um papel fundamental para as plantas, sendo o maior constituinte em proporção, representando até 95% da massa fresca dos frutos e folhas novas. Além disso, a água tem propriedades únicas de viscosidade, tensão superficial, constante dielétrica, calor específico, calor latente de vaporização e de forças de adesão e coesão (COELHO FILHO et al., 2012).

Existem alguns fatores ambientais onde podem ocasionar estresse hídrico em uma planta, são eles: radiação solar, disponibilidade hídrica e temperatura (SOUZA et al., 2006), onde a água é o mais limitante para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (PAIVA et al., 2005).

Com esse conhecimento, a falta de água pode causar o déficit hídrico ocasionando várias mudanças na planta. De acordo com Taiz e Zeiger (2013), o déficit hídrico pode provocar mudanças morfológicas e fisiológicas na planta, podendo levar a redução da expansão celular, redução na área foliar, aumento na abscisão foliar e a redução na fotossíntese. Onde o déficit hídrico é resultado (negativo) do balanço hídrico em que a demanda de água pela evaporação e pela transpiração é maior que o total de água que entra no sistema via precipitação na planta, acarretando estresse à planta (PIRES et al. 2005).

O nível de hidratação em termos do conteúdo ou estado de energia da água na planta pode ser medido quantitativamente, quanto estimado por meio de sintomas visuais (KRAMER, 1988). De acordo com Correia (2014), essa energia livre associada às moléculas de água na planta é o potencial hídrico que representa o potencial químico da água.

Marur (1993), relatou que para a medição do potencial da água em tecidos vegetais há uma grande diversidade de procedimentos utilizados, que em sua maioria os métodos envolvem determinações da pressão de vapor da água em equilíbrio, ou o uso de câmara de pressão descrita por Sholander et. al. (1965).

Um excelente indicador do balanço hídrico é a determinação do teor relativo de água (Equação 1) e a determinação do déficit de saturação hídrica (Equação 2), sendo que essas duas variáveis são determinadas de forma idêntica, e os seus resultados são complementares. O déficit hídrico representa a quantidade de água que a planta precisa alcançar a sua total saturação. Já o teor relativo de água expressa o conteúdo de água ao observado na saturação (LACERDA, 2007).

$$\emptyset = \frac{(PF - PS)}{(PM - PS)} * 100 \quad (1)$$

Em que:

$\emptyset$ : Teor relativo de água (%);

PF: Peso fresco (g);

PS: Peso constante (g);

PM: Peso máximo (g).

$$\Delta w_{sat} = \frac{(PM - PF)}{(PM - PS)} * 100 \quad (2)$$

Em que:

$\Delta w_{sat}$ : Déficit de saturação hídrica;

PF: Peso fresco (g);

PS: Peso constante (g);

PM: Peso máximo (g).

Um importante indicador da disponibilidade de água do solo para as plantas é o potencial matricial do solo (SMAJSTRLA & HARRISON, 1998), correspondendo a uma medida da quantidade de energia requerida pelas plantas para extrair água do solo (SMAJSTRLA & PITTS, 1997).

Há uma grande diversidade de instrumentos empregados para a medição do potencial matricial da água no solo (REICHARDT & TIMM, 2004), sendo o mais comum para o controle da tensão o tensiômetro, que trabalha na faixa de tensão de 0 a 80 kPa (COSTA et. al., 2002).

O tensiômetro consiste de um tubo de Polyvinyl Chloride (PVC) que fica completamente cheio de água e se liga a uma cápsula porosa de cerâmica, em contato com o solo, e na outra extremidade, um vacuômetro (REICHARDT & TIMM, 2004). Assim que o tensiômetro é instalado no solo, a água contida em seu interior entra em contato com o solo e o equilíbrio tende a se estabelecer. Havendo alguma mudança no teor de água no solo e, conseqüentemente, em seu estado de energia, será transmitida à água no interior da cápsula e é indicada pelo dispositivo de leitura (GOMIDE, 2000).

### **3.2 Speckle laser dinâmico**

O laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) é formado por um feixe de luz: coerente (todos os fótons que compõem o feixe emitido estão em fase), monocromático (possui comprimento de onda muito bem definido) e colimada (propaga-se como um feixe de ondas praticamente paralelas), o que torna um equipamento muito bom para uso científico e tecnológico (BOTEGA, 2009).

Como um fenômeno proveniente da iluminação de um laser em um material biológico, o *speckle laser dinâmico* ou *biospeckle laser* é uma fonte sensível de informação sobre a atividade do material iluminado (RIBEIRO et al., 2014). Depois que uma luz coerente incide sobre a amostra, os fótons retro espalhados são registrados em uma imagem que consistem em pontos claros e escuros (AREFI et al., 2015). A intensidade de um dado ponto varia com o tempo, quando o material biológico é iluminado, e este fenômeno é explicado pelo efeito Doppler (DRAIJER et al., 2008), gerando um batimento no padrão de interferência.

Desta forma, a atividade do material estudado é determinada, uma vez, *biospeckle* ocorre com distintos níveis de mudança do padrão de interferência (DAINTY, 1975).

São inúmeras as aplicações utilizando o *speckle laser dinâmico* nas mais diversas áreas do conhecimento, como na agricultura (ZDUNEK et al., 2014), na medicina (BRIERS et al., 2013; GONIK; MISHIN; ZIMNYAKOV, 2002; ZAKHAROV et al., 2009), em materiais não biológicos (ZDUNEK et al., 2014), vigor de sementes (FRACAROLLI et al., 2010) e outros.

### **3.3 Métodos de análise do *Speckle laser dinâmico***

As imagens obtidas a partir do *speckle laser dinâmico* são processadas com a intenção de quantificar, seja numericamente ou graficamente, o nível de atividade da superfície (REIS, 2015).

O nível de movimentação dos dispersores de luz é quantificado e utilizado para materiais homogêneos, na análise numérica, cujo nível de atividade é o mesmo ao longo do material. Entre os métodos de análise numérica, destacam-se o Momento de Inércia (IM) e Diferença dos Valores Absolutos (AVD) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999; CARDOSO; BRAGA, 2014).

#### **3.3.1 Momento de Inércia**

O momento de inércia (Equação 3), (IM), indica com que intensidade ocorreram mudanças na matriz que representa a história temporal do padrão de speckle (THSP) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999). De acordo com Reis 2015 e Rabal & Braga (2008) o *Time History of Speckle Pattern* (THSP) ocorre quando um objeto iluminado pela luz coerente de um laser, sucessivas imagens são registradas por uma câmera CCD. Cada imagem é digitalizada para 8 bits em n níveis de cinza, e somente uma coluna (a do meio) é utilizada para a criação de uma nova pseudoimagem que é composta pelo conjunto de todas as colunas lado a lado. A nova imagem fornece uma matriz com m x n valores, em que m representa as linhas ou histórico do tempo de cada pixel da coluna n vindos de cada padrão do *speckle*. A nova imagem oferece informações da evolução no tempo padrão *speckle* desejado ao longo de cada linha. O IM geralmente é

utilizado para caracterizar numericamente os padrões de *speckle*, assim quantificando a atividade biológica (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999).

$$IM = \sum_{ij} M_{ij}(i - j)^2 \quad (3)$$

Em que:

IM: Momento de Inércia;

$M_{ij}$ : Matriz de co-ocorrência;

$i, j$ : Pixels subsequentes.

De acordo com Botega (2009) é importante correlacionar os valores do Momento de Inércia em um material que varia sua atividade, pois, o é um método estatístico de segunda ordem que classifica a atividade do material. Sendo que os níveis de cinza das imagens podem variar entre 0 a 255, sendo o valor 0 representa um pixel preto e o valor 255 representa um pixel branco.

Para Oulamara et. al. (2005) e Xu et. al. (1995), o Momento de Inércia é obtido pela transformação das imagens do *biospeckle laser* em uma matriz de co-ocorrência (MOC), espaço por tempo, constituída pelo conjunto de imagens coletadas em instantes diferentes, denominada de STS (“*Spatial Temporal Speckle*”), definida pela Equação 4. A MOC é composta por uma matriz de 256 x 256 pixels representando  $2^8$  níveis de cinza, expressa o número de transições de cada pixel no THSP em relação ao seu vizinho imediato (REIS, 2015).

$$MOC = N_{ij} \quad (4)$$

Em que:

MOC: Matriz de co-ocorrência;

$N_{ij}$ : Números de ocorrências;

$i, j$ : Pixels subsequentes.

A medição desses níveis de atividade é importante como forma de ser subjetivo e visual e passar a ser representado por valores numéricos que podem ser utilizados como ferramentas de metrologia e análise (COSTA et al., 2010).

### 3.3.2 Diferença dos Valores Absolutos

A Diferença dos Valores Absolutos (Equação 5), (AVD), é uma variação do Momento de Inércia onde o valor absoluto substitui o quadrado da diferença (BRAGA et al., 2011).

$$AVD = \sum \{M_{ij} * |i - j|\} \quad (5)$$

Em que:

AVD: Diferença dos valores absolutos;

$M_{ij}$ : Matriz de co-ocorrência;

$i, j$ : Pixels subsequentes.

O AVD é obtido de forma que as variações de baixa intensidade de pixel na MOC irão adicionar valores baixos para o resultado final, enquanto que variações elevadas contribuirão com valores maiores no resultado final (BRAGA et al., 2011; RABAL; BRAGA, 2008).

Recentemente, no estudo de Cardoso e Braga (2014) sugeriu-se uma nova normalização e demonstrou que essa normalização, citada como AVD Renan (Equação 6), apresentou melhores resultados relacionados às variações de intensidade nos padrões de speckle.

$$AVD \text{ Renan} = \sum \sum \left( \frac{M_{ij}}{Norm} \right) \frac{|i - j|}{i + j} \quad (6)$$

Em que:

AVD: Diferença dos valores absolutos de Renan;

$M_{ij}$ : Matriz de co-ocorrência;

Norm: Constante de normalização do dado, que é a soma da linha do  $M_{ij}$ ;

$i$ : Pixels subsequentes;

$j$ : Pixels subsequentes.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em duas etapas: a primeira etapa foi a de calibração e testes no protótipo, realizados fora do laboratório, no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária – CEDIA (DEG/UFLA) e a segunda etapa foi realizada no CEDIA e em uma casa de vegetação no Departamento de Agricultura (DAG/UFLA), onde o protótipo foi submetido a análises em campo.

Foi estabelecida a seguinte ordem: calibração e testes fora de laboratório com o protótipo (BOTEGA, 2009), aquisição das imagens na área experimental juntamente com coletas de dados dos tensiômetros e um analisador de gás por infravermelho (ADC) (IRGA do inglês *Infra Red Gas Analyser*), aplicação do método do teor relativo de água (TRA), e por fim, o processamento e análises dos dados coletados.

### 4.1 Calibração e avaliação do conjunto protótipo

De acordo com Botega (2009) foi possível achar uma relação direta entre a área do *speckle laser dinâmico* e a umidade foliar com o uso do protótipo dentro do laboratório.

Sendo assim, nessa primeira fase do trabalho foi calibrar o protótipo para conseguir obter essa relação fora do laboratório, verificando assim se era possível.

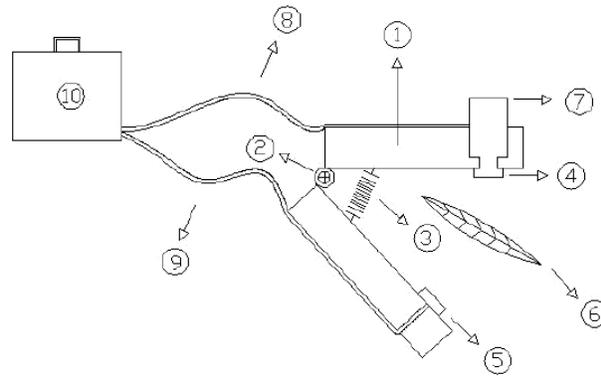
Na coleta das imagens, pelo método *Biospeckle laser*, foram utilizados uma câmera Charge Coupled Device (CCD) da linha Dino-Lite modelo AM3113T de resolução 640 x 480 pixels (VGA), uma fonte de laser de diodo com potência de 1 mW e comprimento de onda de 532 nm, na cor verde. Os dados foram armazenados e analisados em um microcomputador com 8 GB de memória ram, processador Intel(R) Core(TM) i7-6500U de 2,5Hz e sistema operacional Microsoft Windows 10 com software e aplicativos computacionais para a captura e processamento das imagens.

#### 4.1.1 Obtenção das imagens por *Biospeckle laser* na calibração

Essa etapa foi importante para o início do experimento, a fim, de conhecer o comportamento do *Biospeckle laser* com relação à perda de água ao longo do tempo. Correlacionando, assim, a transmissão da luz pela folha com o conteúdo de água na folha ao longo do tempo.

O protótipo desenvolvido por Botega (2009), Figura 1, fixou as folhas da planta de modo não destrutivo; usando um arranjo *Forward-scattering*, onde a iluminação com o laser em uma face da folha e na face oposta teve uma câmera CCD onde foram capturadas as imagens, formando os padrões de *speckle*.

Figura 1 - Modelo do protótipo de identificação do conteúdo de água e os níveis de clorofila



Legenda: O modelo é constituído por: (1) grampo, (2) articulação, (3) mola, (4) e (5) borrachas de vedação, (6) folha (órgão) vegetal, (7) câmera CCD, (8) cabo para transmissão da imagem, (9) cabo de fibra óptica ou laser e (10) unidade de processamento e laser estável de baixa potência ou fonte do laser. Fonte: Botega (2009).

As análises foram feitas usando um conjunto laser - fonte de energia - câmera - computador, de forma a garantir energia suficiente para a execução do procedimento de captura das imagens e análises *on-line*, evitando o mascaramento dos dados.

Foi analisada uma planta enxertada de citros do cultivar (*Citrus reticulata Blanco* x *Citrus sinensis (L.) Osbeck*) e com o porta-enxerto (*Citrus sunki Hort. Ex Tan.*), com aproximadamente dois anos, cultivadas em substrato com a seguinte composição: 41% de argila, 6% de silte e 53% de areia.

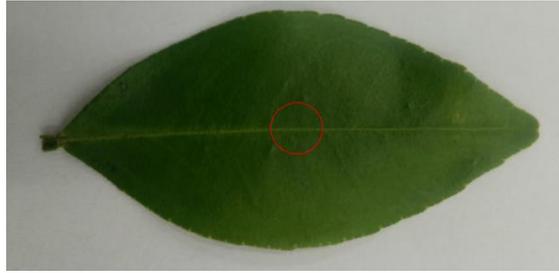
As aquisições das imagens para a calibração do protótipo foram obtidas no período da manhã, iniciando-se a captura das imagens às 9 horas (horário de Brasília) e finalizando por volta das 10 horas e 40 minutos (horário de Brasília), por um período de 11 dias de segunda a sexta-feira, sendo uma coleta por dia. O experimento iniciou no dia 23/06/2017 e finalizou dia 07/07/2017.

Em cada um dos dois dias foram capturadas 150 imagens de cada ponto de cada folha da planta, levando um tempo de captura de 30 segundos para cada ponto, a captura foi realizada por uma câmera CCD com velocidade de captura de 5 frames/segundo.

A muda ficou sob abrigo, localizado no CEDIA, para evitar a interferência de chuva. E todos os dias antes da coleta foram aferidos a temperatura e umidade relativa do ar com o auxílio de um termógrafo digital.

Nessa primeira etapa como o objetivo era verificar qual era a melhor forma para se obter os resultados, foi realizado a divisão de 6 folhas dessa planta em dois grupos diferentes. No primeiro grupo foi realizada a iluminação em 3 folhas, onde foram as mesmas folhas do início ao fim dos testes e estavam localizadas uma na parte inferior, uma no meio e a outra na parte superior da planta. E em cada folha iluminamos 1 ponto por dia (Figura 2), totalizando 42 pontos durante o teste.

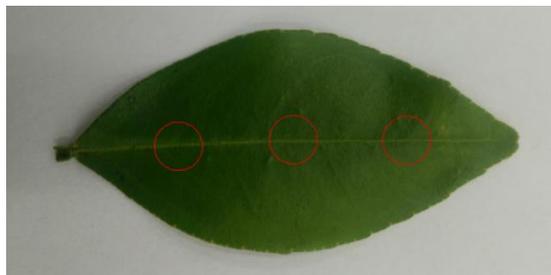
Figura 2 – Folha referente ao grupo 1, com o ponto de análise.



Fonte: Do autor.

Já no segundo grupo, foi realizada a iluminação também em 3 folhas, mas nesse caso, foram folhas diferentes em cada um dos dias e em lugares espalhado da planta. Afim de tirar uma média, foram analisados 3 pontos por folha em cada um dos dias (Figura 3), totalizando 126 pontos durante o teste.

Figura 3 – Folha referente ao grupo 2, com três pontos de análise.



Fonte: Do autor.

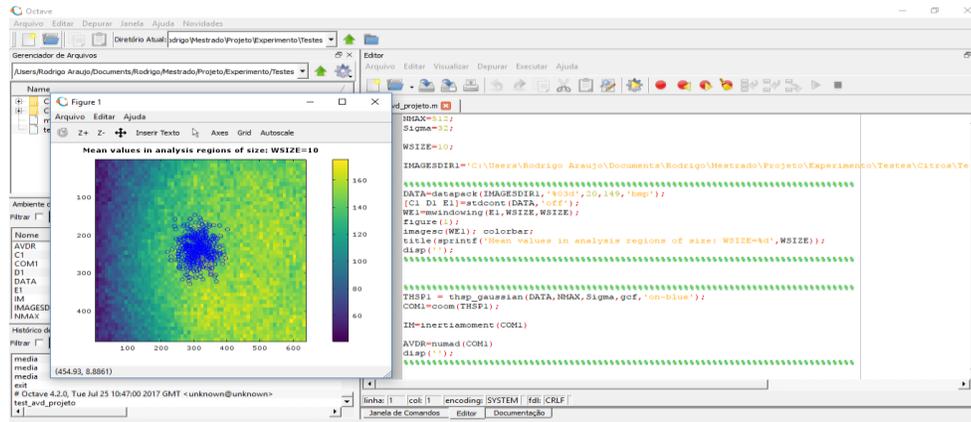
#### 4.1.2 Processamento das imagens e avaliação dos resultados da calibração

Antecedendo a captura das imagens, foi realizada a análise da câmera com o laser pelo software Dino Capture 2.0, de forma a verificar se o laser estava centralizado com a câmera. Após a verificação, utilizou-se para obter as imagens, o programa *Speckle Tool* (BRAGA JR e RIVERA, 2016), possuindo métodos de processamento *on-line* e ferramentas de auxílio na visualização e captura do *Biospeckle laser*.

Neste trabalho, as imagens capturadas foram analisadas por meio de análises numéricas: AVD Renan (Equação 6) e pelo Momento de Inércia (Equação 3). Onde as análises foram realizadas com o auxílio do software Octave, de licença livre, por meio de rotinas computacionais (BRAGA JR e RIVERA, 2016).

No software Octave cada conjunto de 120 imagens, as 30 primeiras imagens capturadas foram descartadas, que foram obtidas por ponto da folha tiveram que ter um ponto marcado na imagem para que fosse processada. Afim de minimizar o erro, foi escolhido o ponto médio de cada uma das imagens para ser analisado, Figura 4.

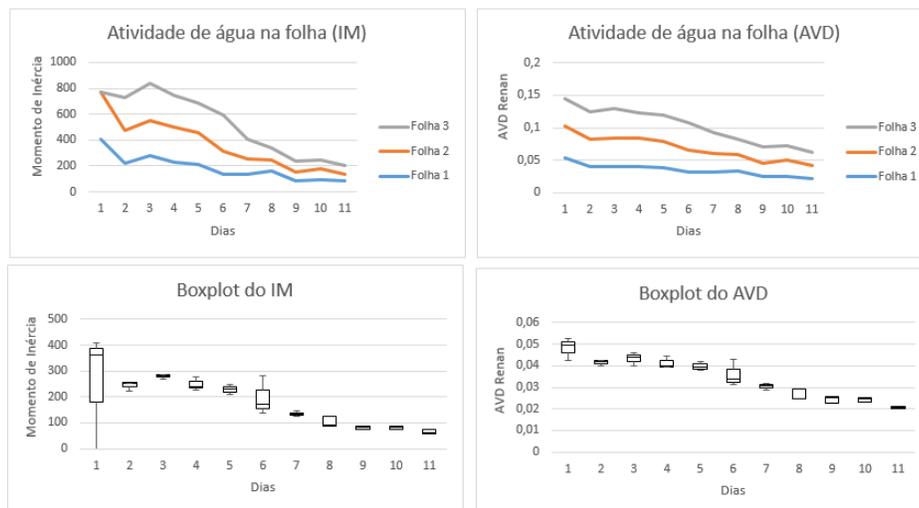
Figura 4 – Ponto escolhido para obtenção dos valores do AVD Renan e do Momento de Inércia.



Fonte: Do autor.

Depois da obtenção dos resultados da calibração, o resultado do grupo 1, mostrou que o protótipo foi capaz de mostrar o ponto onde a planta teve o estresse hídrico e a diminuição da atividade de água a partir desse ponto. Na Figura 5 é mostrado os gráficos da atividade de água na folha pelos dois métodos, AVD Renan e Momento de Inércia, onde ambos demonstraram essa diminuição da atividade. Sendo que a folha 1 estava localizada na parte inferior, a folha 2 na parte superior e a folha 3 na parte do meio da planta, mostrando assim que tem diferença onde se faz a análise.

Figura 5 – Ponto escolhido para obtenção dos valores do AVD Renan e do Momento de Inércia.

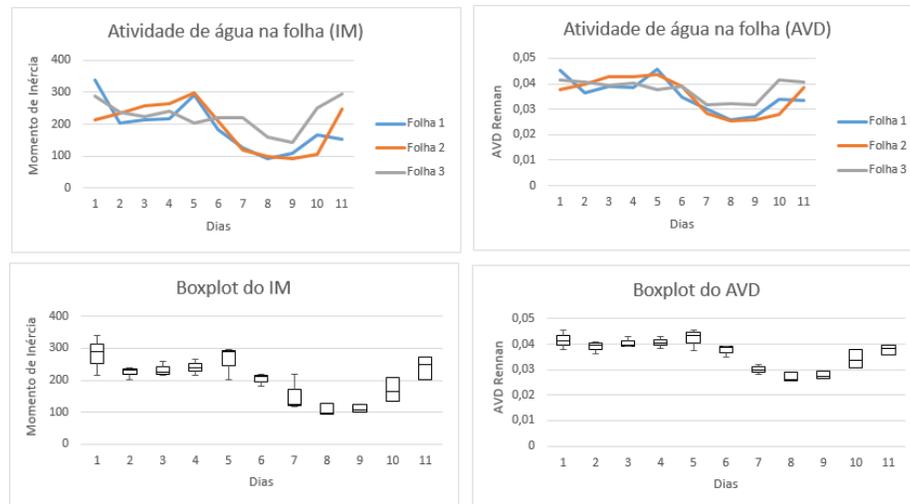


Fonte: Do autor.

Já o resultado do grupo 2, mostrou que o protótipo não foi capaz, nesses 11 dias, identificar o estresse hídrico e a diminuição da atividade de água a partir desse ponto. Na Figura 6 é mostrado os gráficos da atividade de água na folha pelos dois métodos, AVD Renan e Momento de Inércia, onde ambos os

gráficos não conseguiram achar um padrão, já que todo dia foi analisado uma folha diferente em um lugar da planta. Sendo que a folha 1 foram folhas analisadas na parte inferior, a folha 2 foram folhas analisadas na parte superior e a folha 3 foram folhas analisadas na parte do meio da planta, mostrando também que há diferença onde se faz a análise.

Figura 6 – Ponto escolhido para obtenção dos valores do AVD Renan e do Momento de Inércia.



Fonte: Do autor.

Desse modo foi possível analisar a diferença da iluminação quando eram folhas fixas e quando eram folhas aleatórias na planta, onde foi observado que teve diferença entre os grupos. A partir desses resultados foi possível dizer que o experimento iria ser realizado com folhas fixas ao longo do tempo na parte do meio da planta.

#### 4.2 Teste do protótipo em campo

Depois que foi realizado a calibração e a avaliação dos dados foi possível começar o teste do protótipo com uma quantidade maior de plantas e em campo. Onde foram utilizadas as mesmas características da etapa de calibração do protótipo. As aquisições das imagens, ocorreram no período da manhã, iniciando-se a captura das imagens às 9 horas (horário de Brasília), por um período de 11 dias de segunda a sexta-feira, sendo uma coleta por dia. O experimento iniciou no dia 25/09/2017 e finalizou dia 09/10/2017. A quantidade de dias foi a mesma da etapa de calibração do protótipo, uma vez que, com essa quantidade de dias foi possível identificar o ponto de estresse hídrico seguindo de declínio até o ponto de murcha permanente.

As plantas foram abrigadas em uma casa de vegetação localizada no Departamento de Agronomia/UFLA, onde foi aferido diariamente os valores de temperatura e umidade relativa do ar um termógrafo digital.

Foram analisadas 8 plantas enxertadas de citros do cultivar (*Citrus reticulata* Blanco x *Citrus sinensis* (L.) Osbeck) e com o porta-enxerto (*Citrus sunki* Hort. Ex Tan.), com aproximadamente dois anos de idade. Onde estavam plantadas em vasos de 10 kg com a seguinte composição: 41% de argila, 6% de silte e 53% de areia.

Dentro da estufa as plantas ficaram espaçadas em 20 cm uma da outra. E a coleta ocorreu uma após a outra até o termino e sem intervalo, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Plantas dentro da estufa na realização do experimento



Fonte: Do autor.

A textura obtida da composição do solo é fundamental para que se pudesse calcular a capacidade de campo em cada um dos vasos. As plantas foram saturadas de água até a sua capacidade de campo não ocorrendo mais irrigação, deixando-as chegarem perto do ponto de murcha permanente. As plantas foram saturadas com água em cima de uma mesa com furos, assim que começou a gotejar foi parado de colocar água, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Plantas após a saturação para se chegar na capacidade de campo



Fonte: Do autor.

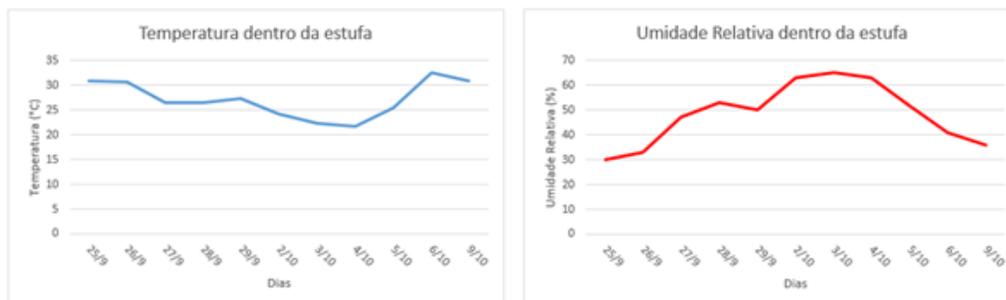
As 8 plantas foram divididas em dois grupos iguais. O primeiro grupo, com 4 plantas, foram submetidas as análises do protótipo (*Biospeckle laser*) e do IRGA, dois métodos não destrutivos, onde não teve a retirada da folha. Já o segundo grupo, com outras 4 plantas, foram aos dois métodos anteriores, citados no primeiro grupo, e ao TRA, método esse que se obtém o teor de água na folha, onde é destrutivo porque se precisa arrancar a folha para realizar as pesagens e levar para a estufa.

#### 4.2.1 Características das condições climáticas na estufa

Pode observar que houve variações de temperatura e umidade relativa mesmo o experimento ocorrendo dentro da estufa, mas foram intensificadas comparadas com a temperatura e umidade relativa fora da estufa.

Na Figura 9 estão os dados da temperatura e da umidade relativa do ar no momento que foram obtidos com as medições diárias, sendo que as medições foram realizadas com um termógrafo digital dentro da estufa.

Figura 9 – Dados da temperatura e umidade relativa no decorrer dos dias de experimento dentro da estufa.



Fonte: Do autor.

As temperaturas máximas observadas estão entre 30,8°C e 32,5°C e as menores observadas estão entre 21,8°C e 27,3°C. Já a umidade relativa está variando de 30% a 65%.

Segundo Purquerio e Tivelli (2006), a temperatura é um elemento agrometeorológico que exerce influência sobre diversas funções vitais dos vegetais, sendo elas: germinação, transpiração, respiração, fotossíntese, crescimento, floração e frutificação.

Esses dados são importante afim de mostrar em quais condições climáticas o experimento foi conduzido e que os resultados como: tempo onde as plantas demoraram para perder água estão ligados diretamente e esses dados.

#### **4.2.1 Obtenção das imagens por *Biospeckle laser***

Foram analisadas 3 folhas em cada uma das 8 plantas, onde a iluminação foi realizada pelo protótipo, formando os padrões do *speckle*. Foi evitado a nervura principal das folhas na iluminação.

As iluminações começaram as 9 horas da manhã (horário de Brasília) e como na calibração, foram capturadas 150 imagens de cada ponto nas folhas, levando 30 segundos para cada ponto sendo que a captura pela câmera CCD era de 5 frames/segundo. E o laser foi ligado na hora das análises.

O laser e o computador foram alimentados com energia elétrica direto da tomada.

##### **4.2.1.1 Processamento das imagens**

Antecedendo a captura das imagens, foi realizada a análise da câmera com o laser pelo software Dino Capture 2.0, de forma a verificar se o laser estava centralizado com a câmera. Após a verificação, utilizou-se para obter as imagens, o programa *Speckle Tool* (BRAGA JR e RIVERA, 2016), possuindo métodos de processamento *on-line* e ferramentas de auxílio na visualização e captura do *Biospeckle laser*.

Também como a calibração, as imagens capturadas foram analisadas por meio de análises numéricas: AVD Renan (Equação 6) e pelo Momento de Inércia (Equação 3). Onde essas análises foram realizadas com o software Octave, de licença livre, por meio de rotinas computacionais (BRAGA JR e RIVERA, 2016).

#### **4.2.2 Obtenção dos dados do analisador de gás no infravermelho (IRGA)**

Com o auxílio do IRGA (ADC BioScientific, modelo LCpro SD) foram analisadas 3 folhas em 6 plantas das oito plantas, 3 plantas de cada grupo. A análise foi realizada no primeiro dia do experimento (25/09/2017) e no último dia do experimento (09/10/2017), sendo realizada as medições das 7horas e 50

minutos da manhã (horário de Brasília) às 8 horas e 50 minutos da manhã (horário de Brasília), em folhas expandidas.

Essa parte foi importante para que fosse possível a comparação dos dados obtidos com o protótipo e a respiração da planta. Assim, o IRGA foi ajustado da seguinte forma: a fonte de luz foi constante de 1000  $\mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 500  $\text{s}^{-1}$  de fluxo. E foi mensurando as seguintes variáveis: fotossíntese (A) ( $\mu\text{mol} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), transpiração (E) ( $\text{mmol}$  de  $\text{H}_2\text{O} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs) ( $\text{mol} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  (Ci) ( $\mu\text{mol} \text{mol}^{-1}$ ).

#### 4.2.3 Obtenção dados dos tensiômetros

O monitoramento de energia da água no solo foi realizado por 8 tensiômetros, um instalado em cada vaso (0,20 m de profundidade). As leituras foram realizadas uma vez ao dia, sempre às 8:50hs, utilizando-se um tensiômetro digital de punção.

Para determinar a curva de retenção da água no solo, uma amostra com o solo dos vasos foi enviada para análise ao Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, onde a amostra com estrutura deformada (terra fina seca ao ar) foi saturada e colocada no funil de Haines, a fim de determinar pontos de baixa tensão (-10, -33, -100 kPa), bem como para a Câmara de Pressão de Richards para os pontos de maior tensão (-300, -500, -1000 e -1500 kPa).

Por meio de uma planilha eletrônica foram obtidos os parâmetros de ajuste da equação: os parâmetros de ajuste do modelo ( $\alpha=0,089 \text{ cm}^{-1}$ , “n”=0,613224 e “m”=2), a umidade de saturação ( $\theta_s=0,5602 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), a umidade residual a 15 atm ( $\theta_r = 0,14925 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e o coeficiente de determinação da regressão ( $R^2 = 0,9698 \%$ ), segundo o modelo proposto por van Genuchten (1980). Na Equação 7, é possível medir a umidade do solo com base em volume do solo usado no experimento.

$$\theta = 0,14925 * \frac{0,5602 - 0,14925}{[1 + (0,089|\Psi|)^{0,6132}]^2} \quad (7)$$

Em que:

$\theta$ : Umidade do solo com base em volume ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ );

$\Psi$ : Tensão da água no solo (kPa).

Assim, de acordo com Mello et al. (2002) foram obtidas a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e a respectiva tensão matricial do solo na capacidade de campo ( $\psi_{cc}$ ), como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Umidade na capacidade de campo em função do parâmetro  $m$  ajustado pelo modelo de van Genuchten (1980).

Característica física do solo		
$\theta_{cc}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> )	$m$ (adm)	$\Psi_{cc}$ (kPa)
0,392	2	3,31

#### 4.3 Obtenção dos dados do teor relativo de água (TRA)

Para avaliação fisiológica de teor relativo de água (TRA) nas folhas, foram obtidos 3 círculos de 1cm de 3 folhas em cada planta do grupo 2, e levadas para o laboratório. O TRA só foi realizado no grupo 2 porque queria observar se os dados do protótipo iam se alterar caso a planta perdesse folhas.

Para que tivesse uma análise completa, antes das folhas serem retiradas das plantas, foi aplicado o método do *Biospeckle laser*, afim de comparar dos resultados. O TRA foi realizado conforme a metodologia desenvolvida por Stoker (1928) e descrita por Klar (1984).

#### 4.4 Correlacionamento dos dados do *biospeckle laser*, IRGA e TRA

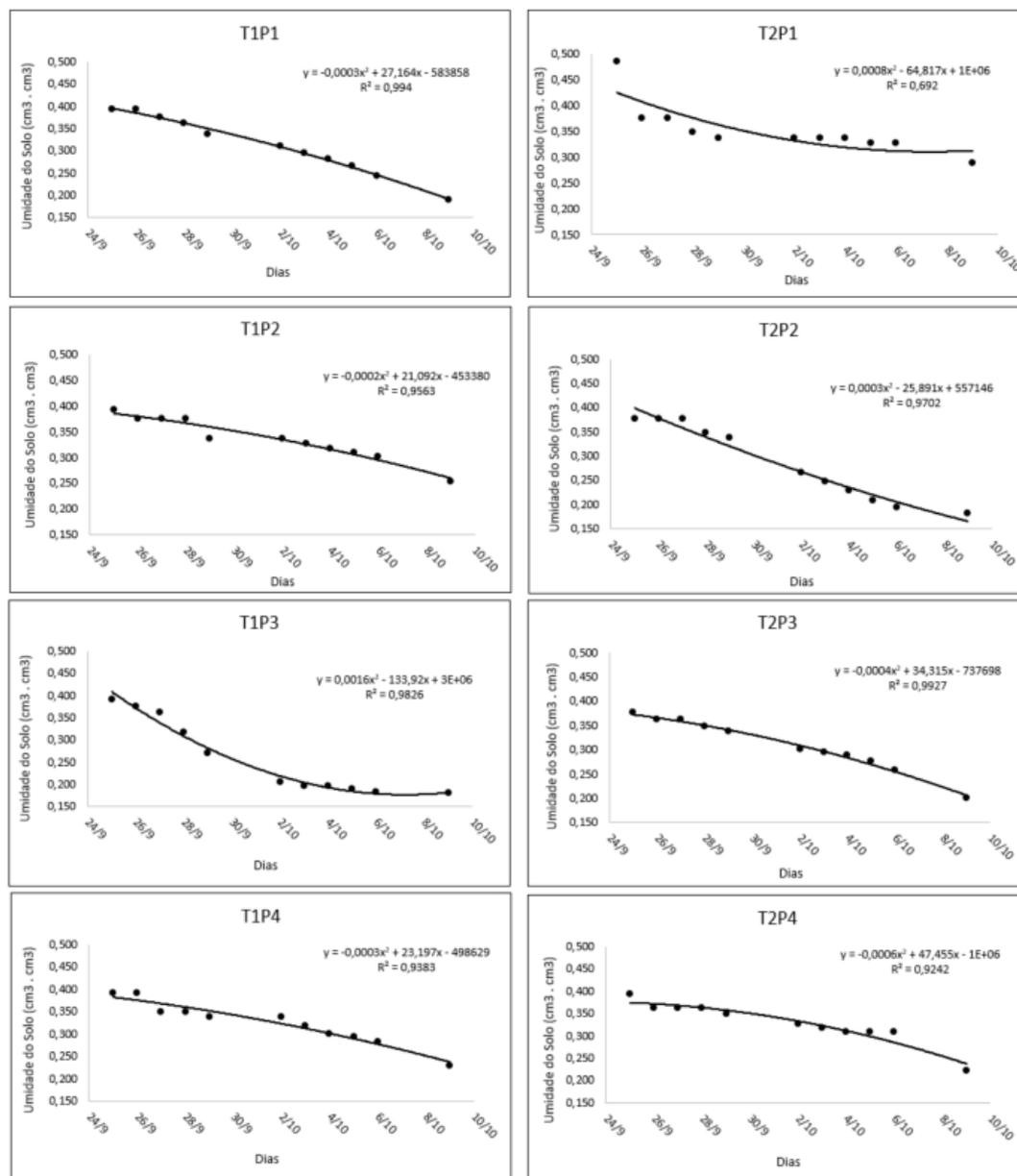
Com os resultados obtidos, foi realizada uma análise fatorial exploratória correlacionando todos os métodos que foram: BSL, IRGA e TRA, usando o Método do Componentes Principais, sem rotação. Foi feita por meio do desenvolvimento de scripts no software R para uso público por meio do pacote MVar.pt versão 1.9.9 (OSSANI; CIRILLO, 2017). O número de fatores foi escolhido com base na proporção explicada pelos autovalores dos mesmos.

## 5 RESULTADOS E DISCURSSÃO

### 5.1 Perda de água pelo solo usando os tensiômetros

Na Figura 10 está representado as curvas de umidade do solo de cada um dos vasos do experimento.

Figura 10 – Curvas da umidade do solo em cada um dos vasos do experimento no decorrer do tempo.



Legenda: (T1P1) grupo 1 planta 1, (T1P2) grupo 1 planta 2, (T1P3) grupo 1 planta 3, (T1P4) grupo 1 planta 4, (T2P1) grupo 2 planta 1, (T2P2) grupo 2 planta 2, (T2P3) grupo 2 planta 3 e (T2P4) grupo 2 planta 4. Fonte: Do autor.

As curvas dos valores de umidade do solo no decorrer dos dias de experimento que foram geradas a partir da Formula 7, foram usados os dados obtidos pelos tensiômetros. Mesmo o solo de cada um dos vasos terem as mesmas composições de silte, areia e argila, não levaram o mesmo tempo para secarem.

Também pode ser observado que a perda de água foi maior nas plantas 1 e 4 do grupo 1 e na planta 2 do grupo 2, onde tiveram leituras do tensiômetros no final do experimento de 0,64, 0,79 e 0,8 bar. Uma hipótese para isso é o tamanho das plantas, nesses 3 vasos as plantas tinham uma maior quantidade de folha, assim o solo teve uma maior perda de água, tanto para a planta quanto para a atmosfera. 8 Os restantes das plantas ficaram entre 0,16 a 0,49 bar.

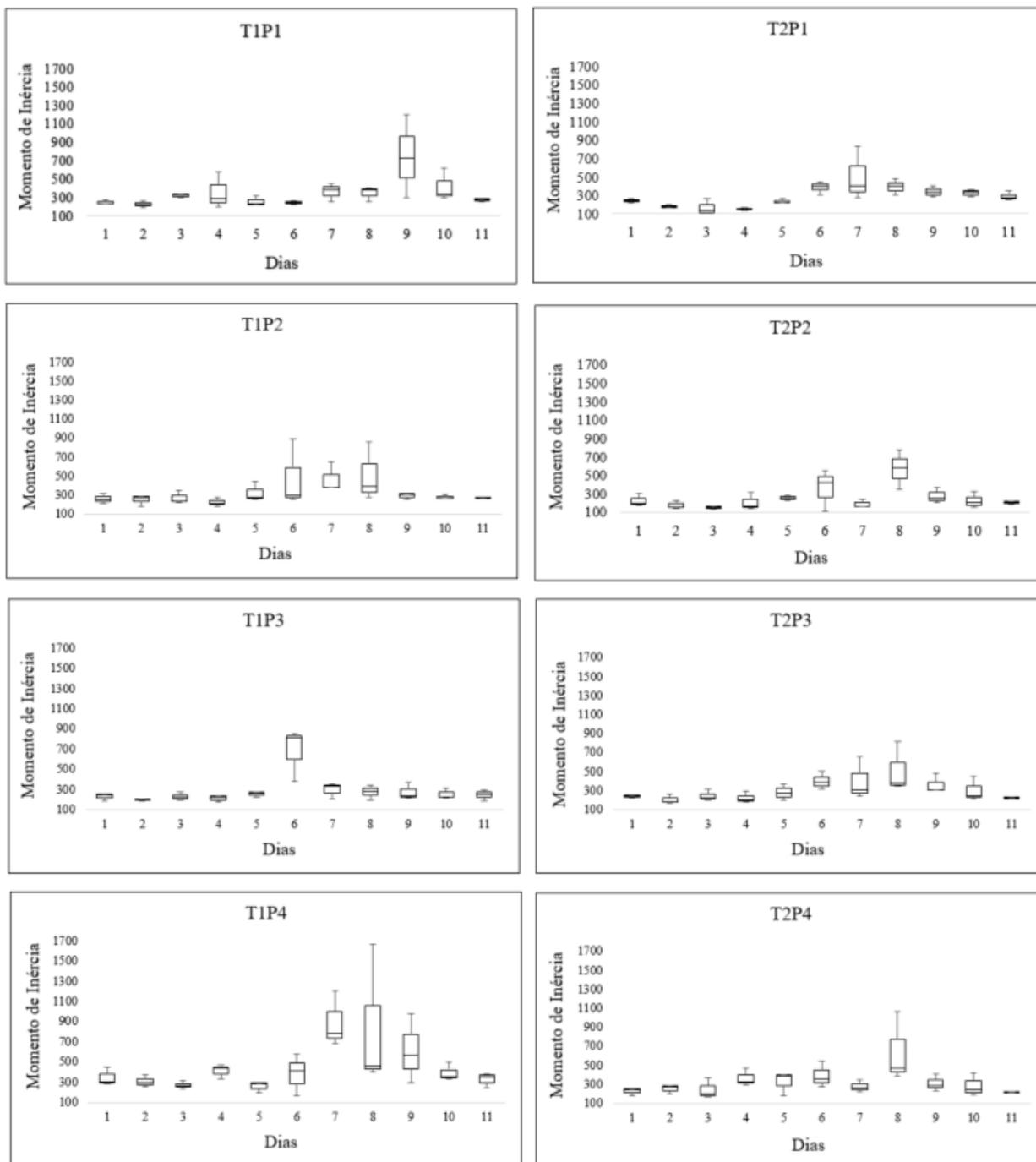
Podemos chegar nessa conclusão porque as curvas estão polinomiais no início, onde a perda de água do solo é mais rápida, mas depois de algum tempo a curva vira linear pelo simples fato de ser mais difícil a perda de água pelo solo.

### **5.3 Análise da diminuição da atividade de água na folha dos citros usando o método BSL**

Com o *biospeckle laser* foi realizado as duas análises: Momento de Inércia e AVD Renan, como já explicado anteriormente. Foi realizado as suas análises afim de descobrir com qual dos dois iria ser possível identificar o pico de estresse e a queda da atividade primeiro, caso existisse diferença. A Figura 11 está mostrando a atividade de água na folha de acordo com a análise do Momento de Inércia. Nos gráficos de Boxplot foi possível observar dois picos de atividade de água pela planta. Entre o 7° e o 10° dia observou-se o pico de estresse hídrico, onde foi observado que após esse ponto todos começaram a diminuir a atividade sem mais nenhuma resistência detectável.

O experimento não realizado em uma quantidade maior de dias, porque conforme a calibração do protótipo que foi realizado anteriormente, foi identificado que após esse pico de estresse, a quantidade de atividade de água na folha da planta só tende a cair.

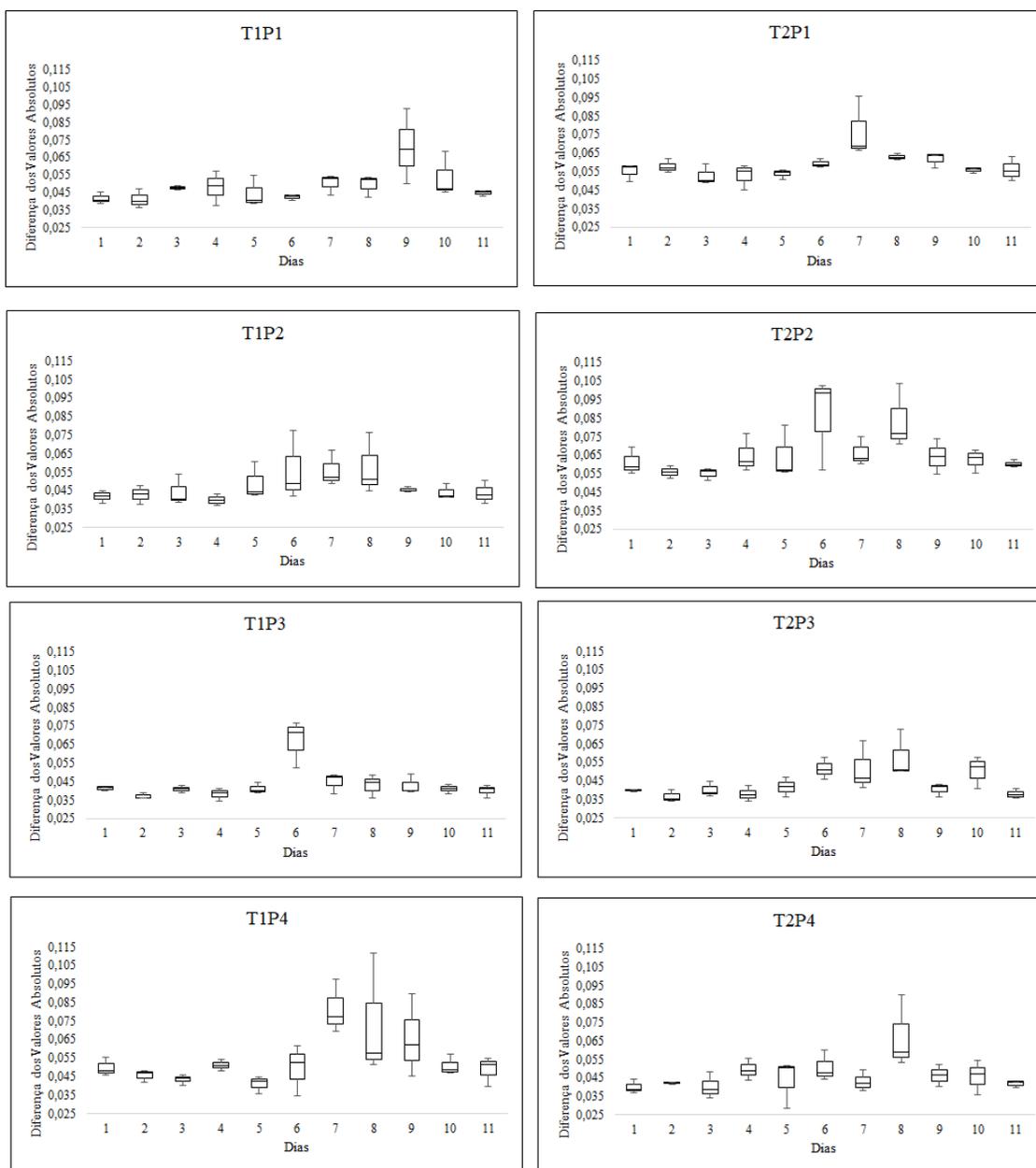
Figura 11 – Diminuição da atividade de água de acordo com a análise do Momento de Inércia.



Legenda: (T1P1) grupo 1 planta 1, (T1P2) grupo 1 planta 2, (T1P3) grupo 1 planta 3, (T1P4) grupo 1 planta 4, (T2P1) grupo 2 planta 1, (T2P2) grupo 2 planta 2, (T2P3) grupo 2 planta 3 e (T2P4) grupo 2 planta 4. Fonte: Do autor.

Já a Figura 12 está mostrando a atividade de água na folha de acordo com a análise da Diferença dos Valores Absolutos. Também foi possível visualizar os dois picos de atividade de água da folha. Onde entre o 7º e o 8º dia tiveram o segundo pico de estresse hídrico, onde foi observado que depois desses pontos todos começaram a diminuir a atividade sem mais nenhuma resistência detectável.

Figura 12 – Diminuição da atividade de água de acordo com a análise do AVD Renan.



Legenda: (T1P1) grupo 1 planta 1, (T1P2) grupo 1 planta 2, (T1P3) grupo 1 planta 3, (T1P4) grupo 1 planta 4, (T2P1) grupo 2 planta 1, (T2P2) grupo 2 planta 2, (T2P3) grupo 2 planta 3 e (T2P4) grupo 2 planta 4. Fonte: Do autor.

Comparando os o Momento de Inércia e o AVD Renan, foi identificado que com ambos o pico de estresse e a queda são identificados, mas com o Momento de Inércia fica mais claro os picos de estresse e a diminuição da atividade de água.

Esse resultado vai de acordo com a (Botega, 2009) que em laboratório achou que o Momento de Inércia representou melhor o conteúdo de água no cafeeiro.

#### 5.4 Comparação entre as metodologias de BSL, IRGA e TRA.

Para a análise de correlação dos métodos foi usado a análise fatorial exploratória usando o Método do Componentes Principais, sem rotação, que utilizou scripts no software R para uso público por meio do pacote MVar.pt versão 1.9.9 (OSSANI; CIRILLO, 2017). O número de fatores foi escolhido com base na proporção explicada pelos autovalores dos mesmos.

Pela Tabela 2 a explicação da variância total atribuída aos dois fatores foi de 94,55%, representando que os fatores estão com resultados bons. Onde a variável que menos foi explicada pelo modelo fatorial foi do TRA%, e a que mais foi explicada foi do IRGA, esses resultados podem ser facilmente verificados tomando-se a comunalidade de cada variável.

Tabela 2 - Tabela referente aos dois primeiros fatores, sem rotação.

Fator	BSL-IM	BSL-AVI	IRGA	TRA %	Variância	% Variância
1	-0,955	-0,909	-0,756	-0,942	3,197	79,93%
2	0,244	0,339	-0,638	-0,062	0,585	14,63%
Com.*	0,971	0,941	0,979	0,892	3,782	94,55%
V.E.**	0,029	0,059	0,021	0,108	-	-

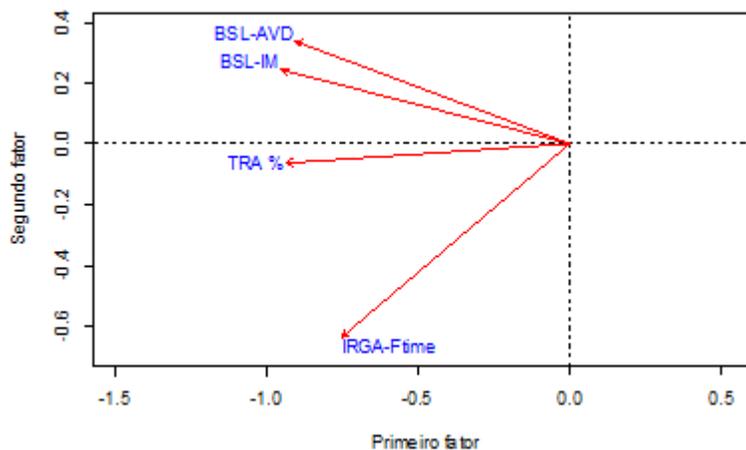
\* Comunalidade \*\* Variâncias Específicas

No primeiro Fator há em modulo fortes cargas (correlações) entre todos os tratamentos, exceto o tratamento IRGA que possui a carga pouco menor, assim pode-se dizer que todos os tratamentos são afetados um pelos outros excetos o tratamento IRGA que afeta menos. Ou seja, quando os valores de BSL alteram os valores do IRGA e TRA também são alterados quase em proporções iguais. Isso ocorre em 79,93% das vezes que os métodos forem comparados.

Já no segundo fator se pode observar que em 14,63% dos casos, o BSL terá uma correlação boa com o IRGA e nem pelo TRA, porque ambos serão afetados menos.

Devido às fortes cargas e a forte comunalidade entre todos tratamentos, o primeiro fator poderia ser chamado de "Fatores dominantes ". As correlações entre os tratamentos e os fatores é melhor visualizado na Figura 13.

Figura 13 – Cargas fatoriais dos tratamentos sem as plantas

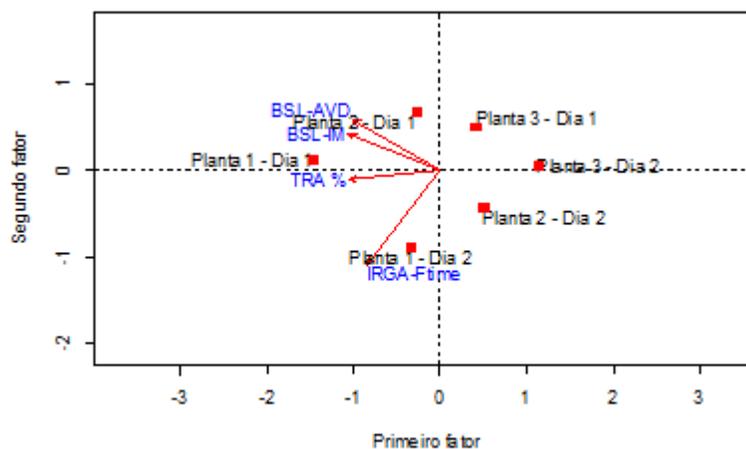


Fonte: Do autor.

Se analisamos somente o segundo fator na Figura 18, podemos observar que o vetor do BSL e TRA estão tendendo para a mesma direção, já o IRGA está no sentido oposto, significando que podemos correlacionar BSL com o TRA.

Para sabermos qual nos métodos foram melhores em cada tratamento, podemos observar a Figura 14, onde o tratamento BSL-AVD, BLS-IM e o TRA estão associados ao tratamento 1, onde não se retirou nenhuma folha durante o experimento. Já o IRGA associa-se ao tratamento 2, onde se teve a retirada de folhas para que pudesse ser realizado o teste de TRA.

Figura 14 – Cargas fatoriais dos tratamentos com as plantas



Fonte: Do autor.

Podendo entender que o protótipo é melhor quando não se retira nenhuma folha da planta. Mas isso não significa que não teria um resultado bom para plantas que teriam essa retirada de folhas.

## 6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi analisado a identificação da atividade de água nas folhas de citros com três diferentes técnicas: biospeckle laser, metodologia padrão medição de teor relativo de água e IRGA.

Pelos resultados foi observado que é possível levar a técnica de BSL para fora do laboratório com o conjunto (laser, fonte de energia, câmera e computador), onde se mostrou eficiente em campo. Onde foi possível o uso sem problemas e de fácil manejo.

Verificou-se que o protótipo conseguiu realizar a medição da atividade de água na folha, identificando o pico de estresse da planta e depois identificando a queda da atividade de água na folha de citros antes que a folha demonstrasse visivelmente.

Com base nesse trabalho, conclui-se que é de grande importância a análise da mesma folha no decorrer dos dias, assim o BSL consegue montar um padrão de atividade de água no decorrer do tempo.

Comparando os o Momento de Inércia e o AVD Renan, foi identificado que com ambos o pico de estresse e a queda são identificados, mas com o Momento de Inércia fica mais claro os picos de estresse e a diminuição da atividade de água.

Foi validado que em 79,93% das vezes o BSL terá resultados correlacionados com o TRA e com o IRGA. Assim, conseguimos encontrar uma semelhança de resultados entre o método proposto e os outros métodos que já estão comprovados experimentalmente.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREFI, A. et al. Non-destructive identification of mealy apples using biospeckle imaging. **Postharvest Biology and Technology**, v. 112, p. 266-276, 2015.
- ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; 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, 1999.
- BOTEGA, J. V. L. **Viabilidade de métodos óticos para identificação de conteúdo de água de folhas de cafeeiros**. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BRAGA JUNIOR, R.A.; RIVERA, F.P. BSLTL – Bio-speckle laser tool library. Disponível em: <<http://www.nongnu.org/bsltl/>>. Acessado em: 18/04/2017 às 15:45.
- BRAGA, R. A. et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. **Optics Communication**, Amsterdam, v. 284, n. 2, p. 646-650, 2011.
- BRIERS, D. et al. Laser speckle contrast imaging: theoretical and practical limitations. **Journal of Biomedical Optics**, Bellingham, v. 18, n. 6, p. 66018:1-66018:9, 2013.
- CARDOSO, R. R.; BRAGA, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics Laser in Engineering**, New York, v. 63, p. 19-24, 2014.
- COELHO FILHO, M. A. et al. **Relação solo-planta-atmosfera**. EMBRAPA, Brasília, cap. 1, p. 1-69, 2012.
- CORREIA, S. Potencial hídrico. **Revista de Ciência Elementar**, Coimbra, v.2, n.1, p. 1-2, 2014.
- COSTA, E.L. et al. Irrigação da cebola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.23, n.218, p. 57-66, 2002.
- DAINTY, J. C. Statistics of normal and anomalous speckle patterns. **Journal of the Optical Society of America**, New York, v. 65, n. 10, p. 1190-1190, 1975.
- DRAIJER, M. et al. Review of laser speckle contrast techniques for visualizing tissue perfusion. **Lasers in Medical Science**, v. 24, n. 639, p. 639–651, 2008.
- FRACAROLLI, J. A. et al. Ipe (*Tabebuia impetiginosa*) seed quality evaluation by means of laser biospeckle. **Selskostopanska Tekhnika**, Sofia, v. 47, n. 2, p. 73-78, 2010.
- GOMIDE, R. L. Automação de sistemas de irrigação em fruticultura irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 16., 2000, Fortaleza. **Palestra...** Fortaleza: SBF, 2000. P. 156-181.

GONIK, M. M.; MISHIN, A. B.; ZIMNYAKOV, D. A. Visualization of blood microcirculation parameters in human tissues by time-integrated dynamic speckles analysis. **Annals of the New York Academy of Sciences**, New York, v. 972, n. 1, p. 1749-6632, 2002.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 408p, 1984.

KRAMER, P.J. Measurement of plant water status: historical perspectives and current concerns. **Irrigation Science**, New York, v.9, n.4, p. 652-657, 1988.

LACERDA, C.F. **Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, parte 1, 79p, 2007.

MARUR, C.J. **Estudo da fisiologia e biofísica do estresse hídrico em duas cultivares de algodoeiro**. 152p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

OSSANI, P. C.; CIRILLO, M. A.; **MVar.pt**: Análise multivariada (brazilian portuguese). 2017. URL <<https://cran.r-project.org/web/packages/MVar.pt/index.html>>. R package version 1.9.9.

OULAMARA, A. et al. Biological activity measurement on botanical specimen surface using temporal decorrelation effect of laser speckle. *Journal of Modern Optics*, London, v. 13, n. 25, p. 10034-10039, 2005.

PAIVA, A.S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, p.161-169, 2005.

PIRES, R.C.M. et al. **Citros**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundag, p. 369-408, 2005.

R CORE TEAM 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>

RABAL, H. J.; BRAGA JUNIOR, R. A. **Dynamic laser speckle and applications**. New York: CRC, 2008. 272 p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 478 p. 2004.

REIS, R.O.; **Influência da intensidade do laser nos mapas de atividade do biospeckle**. 2015. 124 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Sistemas e Automação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras,

RIBEIRO, K.M. et al. Principal component analysis in the spectral analysis of the dynamic laser speckle patterns. **Journal of the european optical society - rapid publications**, v. 9, n.14009, p. 1-10, 2014.

SCHOLANDER, P.F. et. al. Pressure in vascular plants. **Science**, Washington, v.148, n. 3668, p. 339-346, 1965.

SMAJSTRLA, A. G.; HARRISON, D. S. **Tensiometers for soil moisture measurement and irrigation scheduling**: Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences. Florida: University of Florida, 6 p., 1998. (Circular, 487).

SMAJSTRLA, A. G.; PITTS, D. J. **Tensiometers servisse, testing and calibration**: Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences. Florida: University of Florida, 6 p., 1997. (Bulletin, 319).

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5<sup>a</sup>.ed. Porto Alegre: Artemed, 2013. 820p.

XU, Z. et al. Temporal and spatial proprieties of the time-varing speckles of botanical specimens. **Optical Engineering**, Redondo Beach, v. 34, n. 5, p. 1487-1505, 1995.

ZAKHAROV, A.C. et al. Dynamic laser speckle imaging of cerebral blood flow. **Optics Express**, Washington, v. 17, n. 16, p. 13904-13917, 2009.

ZDUNEK, A. et al. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: a review. **Optics and Lasers in Engineering**, London, n. 52, p. 276-285, 2014.