

ANDRÉ LUÍS DA SILVA QUIRINO

**VOLUME FOLIAR DE PLANTAS ARBÓREAS COM SENSOR LASER
NA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL

2014

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e Classificação da
Biblioteca Central da UFV

T

Q8v
2014 Quirino, André Luís da Silva, 1980-
Volume foliar de plantas arbóreas com sensor laser na aplicação de
agrotóxico / André Luís da Silva Quirino. - Viçosa, MG, 2014.
xv, 55f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.49-55.

1. Produtos químicos agrícolas - Aplicação. 2. Tecnologia de
aplicação. 3. Sensor laser. 4. Automação. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-
graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 632.95

ANDRÉ LUÍS DA SILVA QUIRINO

**VOLUME FOLIAR DE PLANTAS ARBÓREAS COM SENSOR LASER
NA APLICAÇÃO DE AGROTÓXICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

APROVADA: 21 de fevereiro de 2014



Edney Leandro da Vitória



Gilton José Rodrigues



Rogério Faria Vieira



Haroldo Carlos Fernandes
(Coorientador)



Mauri Martins Teixeira
(Orientador)

Aos meus pais, Maria José da Silva Quirino (in
memoriam) e Pedro Eugênio Quirino.

À minha irmã, Cíntia da Silva Quirino.

Às minhas avós, Maria Helena (in memoriam) e Maria de Lourdes.

À minha noiva, Vera.

Ao maior de todos os meus tesouros, minha filha, Ana Beatriz.

Aos meus tios e primos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o maior de todos, pela oportunidade de chegar a este momento e pelo discernimento para trilhar os caminhos até aqui.

Aos meus pais, por sempre me apoiarem em minhas decisões. À minha mãe, pelo carinho, sinto muito a sua falta, e ao meu pai, por me ensinar que existem outros caminhos.

À minha irmã, pela paciência, por sempre me ouvir, mesmo sem entender muita coisa.

À mulher da minha vida, Vera Lúcia, por não me deixar desistir, mesmo no pior momento, os meus mais sinceros agradecimentos.

Aos meus tios e primos, por compartilharem comigo os bons e maus momentos.

Às minhas avós Maria Helena e Maria de Lourdes, pelas palavras de incentivo.

Aos moradores da Rua do Pintinho, colegas, amigos, vizinhos e agregados, por me acolherem.

Às professoras Raja e Dona Zinha, pelos primeiros passos rumo ao mundo das letras. À Dona Neuza, Dona Corita, Dona Hilda, Zeca, Paulinho e a tantos outros que fizeram parte da minha vida no ensino médio.

A todos os professores do curso de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, especialmente aos professores Lino, Antônio Alberto, Francisco Affonso e Carlos Sedyama.

Aos colegas do laboratório de herbicidas na planta: Luiz Henrique, Pará, Léo Tuffi, Léo D'Antonino, Barbosa, Edinho, Rafael, e outros.

Ao professor Mauri, pelo apoio, dicas e muita compreensão a todo momento.

Ao professor Alexandre Brandão, do Departamento de Engenharia Elétrica, e ao estudante Matheus Zonta, do Departamento de Engenharia de Produção.

Aos funcionários do Laboratório de Mecanização Agrícola: Wantuil, Danilo, Geraldo, Marcelo.

Aos funcionários do DEA: Dona Maria, Edna, Galinari, Evaristo,

Graça, Marcos, Rosalia, Juvercindo, José Mauro, Claudenilson, Délio, Renato, João Vitor. Aos colegas da pós-mecanização: Amanda, Marcus, Cleyton, Gustavo, Raphael, Robson, Flávio, Paula, Wevergton, Wagner Peixe, Wagner, Geice, Marcelo, Daniel, Fred, Samuel, Eduardo, Denis, Murilo, Ronaldo, Walter, Renato, Vitor, Marley, Lorena, Selma, Allisson, Gerson (in memorian), Jefferson, Ariston, Áian, Enrique, Antônio, Sérgio, Edney, Nildimar, Pedro, Christiam, Humberto, Ronaldo, Graciele, Júlio, Jardênia, Juliana.

Enfim, a todos, que me auxiliaram nessa caminhada, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

André Luís da Silva Quirino é filho de Maria José da Silva Quirino e Pedro Eugênio Quirino e irmão de Cíntia da Silva Quirino.

Nasceu na cidade de Viçosa-MG, em janeiro de 1980.

Cursou o ensino fundamental na Escola Estadual Ministro Edmundo Lins, no ano de 1990.

No ano de 1991, ingressou como aluno do ensino médio na Escola Estadual Dr. Raimundo Alves Torres o qual concluiu em 1997.

Cursou Engenharia Agrônômica na Universidade Federal de Viçosa, entre 2002 e 2007.

Em 2008, ingressou no programa de pós-graduação do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa.

Em 12 de maio de 2012, tornou-se o orgulhoso pai de Ana Beatriz Libânio Quirino.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. Quantificação do volume do dossel de plantas arbóreas: Método Eletrônico	2
2.2. Quantificação do volume do dossel de plantas arbóreas: Método Manual.....	3
2.3. Velocidade de trabalho	4
3. OBJETIVOS	4
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4. MATERIAL E MÉTODOS	5
4.1. Caracterização do dispositivo laser	5
4.1.1. Operando o sistema laser lidar	5
4.1.2. Interação objeto sensor	8
4.1.3. Alcance do dispositivo laser	9
4.1.4. Relação entre distância e diâmetro dos pontos mensurados.....	9
4.1.5. Detecção do objeto	12
4.1.6. Interface LMS computador.....	13
4.1.7. Interface Ethernet	13
4.1.8. Interface CAN.....	13
4.1.9. Interface Porta Serial	14
4.1.10. Configuração do LMS por envio de mensagens.....	14
4.1.11. Interpretação dos dados de mensuração disponibilizados pelo dispositivo laser	18
4.2. Programa computacional MATLAB.....	19
4.3. Interação e transferência de dados entre o LMS e o programa computacional MATLAB.....	19
4.3.1. Configuração do LMS por envio de mensagens.....	19
4.3.2. Conversão do dados vindos do LMS	21
4.4. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas	22
4.4.1. Determinação do volume de plantas arbóreas utilizando métodos manuais	23

4.5. Caracterização do dossel de plantas arbóreas, utilizando o LMS	25
4.5.1. Representação do dossel de plantas arbóreas pelo método de nuvem de pontos, utilizando o LMS	25
4.5.2. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método das áreas..	27
4.5.3. Caracterização da nuvem de pontos, correlação entre número de impactos e área foliar do dossel de plantas arbóreas	27
4.6. Determinação da altura e da largura do dossel de plantas arbóreas, utilizando o LMS	29
4.7. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método da envoltória convexa	30
5. Delineamento Estatístico.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSÃO	30
6.1. Configuração do LMS 111 por meio do envio de mensagens	30
6.2. Volume de plantas arbóreas, utilizando o método manual	31
6.3. Volume do dossel de plantas arbóreas pelo método das áreas.....	33
6.4. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método da envoltória convexa	36
6.5. Caracterização do dossel de plantas arbóreas, com o LMS	38
7. CONCLUSÕES	49
8. REFERÊNCIAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Sensor LMS 111. Fonte: SICK AG, (2009).	5
FIGURA 2. Mensuração do ambiente de forma bidimensional, utilizando-se um sistema laser (A) e representação do plano de mensuração (B). Fonte: CARAMÉS, (2007).....	6
FIGURA 3. Esquema do feixe laser emitido e recebido pelo LMS. Fonte: PALACIN et al, (2006) modificado.	7
FIGURA 4. Princípio de determinação da distância. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).	7
FIGURA 5. Diâmetro do objeto menor que o diâmetro do feixe laser emitido. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009)).	8
FIGURA 6. Alcance de escaneamento do LMSLIDAR, em função da emissão do alvo. Fonte: (Sick, Düsseldorf, Germany, 2009).	9
FIGURA 7. Imagem em corte transversal do diâmetro distância dependente do feixe laser emitido sobre gabaritos. As distâncias variaram de 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) 6 (f), 7 (g) e 8m (h).....	10
FIGURA 8. Distância entre os pontos mensurados em função da resolução angular determinada pelo usuário. Resolução angular de 0,50 (a) e de 0,25° (b). Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).	11
FIGURA 9. Diâmetro do feixe laser em função da distância entre mensurações para alcance de 20 m. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).	11
FIGURA 10. Imagem em corte transversal de um feixe laser emitido pelo sensor na direção de 0 (A), 45 (B), 90 (C), 135 (D) e 180° (E). Fonte: SANZ-CORTIELLA et al., (2011b).	12
FIGURA 11. Tamanho mínimo do objeto a ser mensurado. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).....	12
FIGURA 12. Distância mensurada pelo LMS. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).	13
FIGURA 13. Fluxograma de envio de mensagens para configuração e utilização do LMS.....	17
FIGURA 14. Desenho esquemático do LMS acoplado o trilho.	22
FIGURA 15. Conexão entre os elementos utilizados no procedimento de mensuração.	23

FIGURA 16. Esquema dos pontos de mensuração do dossel de plantas arbóreas, considerando-se o método de Whitney e o dossel como um objeto de volume prolato (Vista Frontal).	25
FIGURA 17. Procedimento de mensuração do LMS.	26
FIGURA 18. Divisão do dossel em partes para análise de correlação.	28
FIGURA 19. Medidor de área foliar modelo CI-202.	28
FIGURA 20. Placa utilizada como referência para determinação da distância entre fatias.	29
FIGURA 21. Sequência de confecção do polígono: método das áreas, para cálculo do volume foliar do dossel de plantas arbóreas. Nuvem de pontos original de uma fatia (A), interligação entre os pontos de uma fatia (B), área mensurada (C).	33
FIGURA 22. Método da envoltória convexa aplicado sobre duas nuvens de pontos de acordo com a velocidade de deslocamento. Velocidade de deslocamento de 0,5 (A) e 6 km h-1 (C). Método da envoltória convexa aplicada a nuvem de pontos obtida nas velocidades de 0,5 (B) e 6 km h-1 (D).	37
FIGURA 23. Plantas utilizadas para realização do procedimento de mensuração.	38
FIGURA 24. Nuvem de pontos original, apresentando as três plantas objeto de estudos.	39
FIGURA 25. Nuvem de pontos representativa dos dosséis das plantas de café. Planta 1 (P1), Planta (2) e Planta 3 (P3), (Vista Frontal).	40
FIGURA 26. Influência da velocidade de deslocamento na representação do dossel de uma mesma planta arbórea, na forma de nuvem de pontos da mesma planta e nas velocidades de 1 (A), 3 (B) e 6 km h-1 (C), (Vista Frontal).	41
FIGURA 27. Representação em nuvem de pontos do procedimento de balizamento (Vista Frontal).	42
FIGURA 28. Vista frontal da representação em nuvem de pontos do dossel da planta 2 (Vista Frontal).	43
FIGURA 29. Vista frontal da divisão da nuvem de pontos representativa do dossel da planta nos terços inferior, médio e superior (Vista Frontal).	43
FIGURA 30. Vista lateral direita da representação em nuvem de pontos das divisões do dossel de cada um dos terços, nas partes externa (A) e interna (B), (Vista Lateral Direita).	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Características do scanner laser LMS 111	8
--	---

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. Volume do dossel (m ³) de plantas arbóreas, utilizando diferentes métodos (V _W – Volume de Whitney, V _P Volume Prolato, V _a Volume pelo método das áreas) ..	32
QUADRO 2. Volume do dossel de plantas arbóreas (m ³) em função da velocidade de deslocamento.....	34
QUADRO 3. Volume do dossel de plantas arbóreas (m ³) em função da velocidade de deslocamento e métodos de manuais.....	362
QUADRO 4. Diferença percentual (*) entre o volume mensurado pelo LMS e pelos métodos manuais	373
QUADRO 5. Diferença percentual (*) entre o volume mensurado pelo LMS e o medido pelos métodos manuais.....	34
QUADRO 6. Densidade da nuvem de pontos (pontos cm ⁻²) na parte externa do dossel de uma planta de café (P2) nos três terços em função da velocidade de deslocamento.....	41
QUADRO 7. Densidade da nuvem de pontos (pontos cm ⁻²) na parte interna do dossel de uma planta de café (P2) nos três terços em função da velocidade de deslocamento.....	42
QUADRO 8. Altura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento.....	43
QUADRO 9. Altura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento em comparação com o método manual.....	44
QUADRO 10. Largura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento.....	45
QUADRO 11. Largura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento em comparação com o método manual.....	45

RESUMO

QUIRINO, André Luís da Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Volume foliar de plantas arbóreas com sensor laser na aplicação de agrotóxico.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Domingos Sárvio Magalhães Valente e Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

A mensuração de plantas por meio do método TRV (Tree Row Volume) considera cada linha de plantas a ser pulverizada como uma parede de folhagens, sendo o volume de pulverização suficiente para recobri-la. Esta medição não leva em conta a desuniformidade do dossel, com relação à altura, à profundidade e à densidade foliar das plantas. É necessário conhecer essa variabilidade espacial do dossel de plantas, para individualizar a aplicação de agrotóxicos. O sistema LIDAR é uma técnica de sensoriamento remoto baseada na medição do tempo que um pulso laser leva entre a transmissão e a recepção. Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a utilização do LMS (Laser Measurement System) como ferramenta para determinar, em tempo real o volume do dossel de plantas arbóreas em diferentes velocidades de trabalho e o seu desempenho em caracterizar o dossel de plantas arbóreas. Primeiramente, foi avaliado o desempenho do programa computacional MatLab, como mediador da interação e da transferência de dados entre o LMS e o computador, de maneira a representar o ambiente real de forma virtual. Para determinar o volume do dossel de plantas arbóreas, em tempo real, utilizou-se o método das áreas e da envoltória convexa. Também foram obtidos dados relativos ao número de impactos no interior do dossel. A comunicação entre o computador e o LMS foi efetuada por meio de uma conexão ethernet, que permitiu a transferência de dados em tempo real. O LMS foi acoplado a uma ponte móvel, com velocidade controlável, a uma altura de 0,97 m e a uma distância de 1,52 m do caule da planta. Foram utilizadas as velocidades de 0,5; 1; 2; 3; 5 e 6 km h⁻¹, estas velocidades foram utilizadas para realizar o estudo de desempenho do sistema em condição controlada, com velocidade constante e percurso pré-determinado. A mensuração manual do volume do dossel foi realizada com a mensuração do volume de Whitney. Ademais considerou-se o volume do dossel como um esferoide prolato e a altura estratificada. Gerado o perfil de uma fatia simples, mensurada pelo LMS, a área superficial, perpendicular à linha de percurso do laser foi obtida com o método de coordenadas superficiais. De posse dos dados de nuvem de pontos, aplicou-se a função Convex hull (envoltória convexa) sobre os pontos correspondentes a cada uma das plantas, para obtenção de seu volume. Avaliou-se a

capacidade do método empregado em determinar a altura (A_m) e a largura do dossel (L_m), por meio da análise da nuvem de pontos 3D gerada. Uma vez conhecido o perfil de uma fatia simples mensurada pelo LMS, a área foi obtida superficial, perpendicular à linha de percurso do LMS. O volume do dossel foi calculado pela soma do volume de cada fatia simples. Nessa cálculo incluíram-se todas as fatias no comprimento total da linha de trajetória. O programa computacional MatLab foi eficaz como software para o envio de mensagens, a fim de configurar e utilizar o LMS. A medição do volume de plantas arbóreas com o LMS permitiu determiná-lo em tempo real. Os resultados sugerem que a determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método da envoltória convexa deve ser realizada quando a velocidade de deslocamento é superior a 3 km h^{-1} . O LMS mostrou é capaz de coletar dados acerca das características de altura e largura de plantas arbóreas, com economia de mão de obra e tempo.

ABSTRACT

QUIRINO, André Luís da Silva, D.S., Universidade Federal de Viçosa, February, 2014. **Leaf volume of woody plants with laser sensor in the application of pesticides.** Adviser: Mauri Martins Teixeira. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes, Domingos Sárvio Magalhães Valente and Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

Plants measurement using the TRV method considers each plant row to be sprayed as a foliage wall, and the spraying volume should be enough to cover it. This consideration does not take into account an uneven canopy, with respect to the height, the depth and the plant foliar density. Considering the spatial variability of the plant canopy, as the height, depth and density, it becomes necessary to individualize the pesticides application on the plants crown. The LIDAR system is a remote sensing technique based on measuring the time that a laser pulse takes between its transmission and reception. The aim of this study was to evaluate the use of LMS (Laser Measurement System), 111 model, as a tool to determine, in real time, the canopy volume of woody plants in different working speed, as evaluate its performance in characterize the canopy of woody plants. First of all, it was evaluated the performance of MatLab software, as mediator of the interaction and the data transfer between the LMS and the computer, in order to represent the real environment virtually. To determine the canopy volume in real time, it was used the areas method and the convex hull methodology. Data of number of impacts in relation to the depth, the height and the width of the canopy were also extracted. The communication between the computer and the LMS was done by an Ethernet connection, which allowed data transfer in real time. The LMS was coupled to a mobile bridge, with the ability to control the working speed at a height of 0.97 m and 1.52 m from the plants row. It was used the working speed of 0.5, 1, 2, 3, 5 and 6 km h⁻¹. This configuration was used to study the system performance, working in controlled conditions, with constant speed and predetermined route. The manual measurement of canopy volume was performed with the Whitney volume determination, also considering the canopy volume as a prolate spheroid, and the stratified height method. Generated the pattern of a simple slice measured by the LMS, the surface area perpendicular to the laser travel line was obtained by applying the surface coordinate method. With the data of the cloud of points, it was applied the convex hull function on the corresponding point of each plant to obtain its volume. It was evaluated the ability of the used method for determining the canopy height (Am) and the width (Lm) by analyzing the 3D cloud of points generated. Once the pattern of a simple slice measured by the LMS was known, the surface area perpendicular to the

LMS travel line was obtained. The canopy volume was calculated by summing the volume of each simple slice, so all of the slices in the total length of the travel line were included. It was possible to use the MatLab software as a mediator of messages sending in order to configure and use the LMS. The methodology for measuring the canopy volume with the LMS was able to determine the canopy volume in real time. The measurement of canopy volume of woody plants with the LMS sensor is an important tool to save spray solution volume. The determination of canopy volume by the convex hull method is indicated when the working speed is higher than 3 km h^{-1} . Under the conditions of this study, the LMS showed being a tool that is able to collect data from height and width of woody plants, making a less arduous procedure and reducing the need for the work to be performed manually.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados da Associação Brasileira das Indústrias de Química Fina, Biotecnologia e suas Especialidades (ABIFINA, 2013), foram gastos, pelo Brasil, no ano de 2011, um total de US\$ 8.500.000,00 na importação de agrotóxicos. Considerando-se o fato de que o principal método de controle de pragas e doenças utilizado é o químico (FERREIRA et al., 2007) e que cerca de 70 % do total pulverizado é perdido para o ambiente, (Zhu et al., 2006), conclui-se que essa tecnologia de aplicação é considerada como poluidora (BÓCOLI, 2009).

Um fator que pode levar ao desperdício de agrotóxicos é o modo de calcular o volume a ser pulverizado. Com o objetivo de diminuir o volume de calda pulverizado em plantas arbóreas, Morgan (1964) abordou, pela primeira vez, o problema. Até então as recomendações do volume de pulverização eram feitas com base na área total da lavoura e não no volume foliar do dossel. A partir dessa data, as recomendações passam a ser realizadas, levando-se em consideração o conceito de TRV (Tree Row Volume), ou seja, o volume de pulverização por unidade de área passa a ser definido em função do volume de vegetação existente num hectare e da infestação provocada pela praga (MAGNO JÚNIOR et al., 2011).

A mensuração de plantas por meio do método TRV considera cada linha de plantas a ser pulverizada como uma parede de folhagens. O volume de pulverização deve ser suficiente para cobri-la. A metodologia do TRV não leva em conta a desuniformidade do dossel, com relação à altura, à profundidade e à densidade foliar das plantas. Tentativas de contornar esse problema foram realizadas por Buyers et al. (1971) com algumas adaptações realizadas por Manktelow e Praat (1997). No entanto o conceito do dossel de plantas como parede de folhagem não foi totalmente afastado.

Devido a variabilidade na altura, profundidade e densidade do dossel é necessária individualizar a aplicação de agrotóxicos sobre as copas, ou seja, as recomendações deixam de ser feitas em litros por hectare ($L ha^{-1}$), passando a ser feitas em litros por plantas ($L planta^{-1}$). Para a realização de uma aplicação, considerando-se cada planta individualmente, é necessário que a mensuração da planta seja também individualizada.

Os parâmetros geométricos e estruturais de plantas arbóreas, como volume e área ocupada são, hoje derivados de mensurações manuais da altura e largura, o que demanda

tempo e mão de obra. Em razão da demora de execução do processo e do alto custo, outros métodos estão sendo utilizados, como estereoscopia aérea (TUOMINEN; PEKKARINEN, 2005), imagens de satélite (LE MAIRE et al., 2008), sensores ultrassônicos (JEON et al., 2011) e sensores laser para varredura por detecção de luz – LIDAR (SUN et al., 2011).

Segundo Palacin (2007), a mensuração do dossel de plantas com base em imagens requer a utilização de algoritmos complexos e softwares potentes, para sua realização. Esse mesmo autor cita que o ângulo divergente das ondas ultrassônicas limita a utilização de sensores ultrassônicos, afetando a resolução espacial e a acurácia nas determinações do volume do dossel.

O sistema LIDAR é uma técnica de sensoriamento remoto baseada na medição do tempo que um pulso laser leva entre sua transmissão e sua recepção. A utilização da técnica LIDAR para mensuração da vegetação envolve o uso da radiação no comprimento de onda do infravermelho, mas também é possível a utilização da radiação no espectro do visível (ROSELL-POLO et al., 2009). A vantagem desse método é deve-se ao fato de o feixe emitido pelo LMS (Laser Measurement System) ser estreito, com pouca divergência. Atualmente, esta técnica vem sendo utilizada para medir o dossel de florestas e caracterizar áreas de cultivo (GARCÍA et al., 2010; KOCH, 2010; ZHAO et al., 2011). A maioria dessas mensurações foi realizada com o LMS acoplado a aviões ou satélites, o que torna o processo muitas vezes inviável. Vislumbrando-se a possibilidade de redução dos custos, Van der Zande et al., (2006) introduziram a utilização do LMS montado sobre rodas. Ele foi disseminado, nos últimos dez anos, por causa da robustez do processo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Quantificação do volume do dossel de plantas arbóreas: Método Eletrônico

A quantificação do volume do dossel de plantas arbóreas com os sensores LMS, que realizam a mensuração em tempo real, tem como objetivo adequar instantaneamente, o volume de pulverização à massa vegetal do dossel.

Para a caracterização geométrica do dossel de plantas arbóreas, alguns métodos são utilizados, incluindo técnicas de análise de imagens, estereoscopia fotográfica, análise do espectro luminoso, varredura ultrassônica e varredura óptica (ROSELL et al., 2009).

Moltó et al. (2000) utilizaram sensores ultrassônicos para determinação do volume do dossel e ajuste em tempo real do volume de pulverização. Com o mesmo

objetivo, Solanelles et al. (2006) desenvolveram protótipo em que o volume pulverizado foi determinado em função da altura de plantas.

Sensores ultrassônicos foram utilizados também por Zaman e Salyani (2004) e Zaman et al. (2005). A metodologia da fotografia digital foi utilizada por Phattaralerphong e Sinoquet, (2005); Leblanc et al. (2005) e Solanelles et al. (2006).

Aschoff et al. (2004), Van der Zande et al. (2006) e Rosell et al. (2009) utilizaram sensores laser. Estereogramas foram utilizadas por Andersen et al. (2005), Rovira-Más et al. (2005) e Kise e Zhang, (2006). Sensores de luz foram avaliados por Giuliani et al. (2000) e Bongers (2001) utilizou imagens de radar de alta resolução (ou tomografia computadorizada de raio-X).

Todas estas metodologias vêm oferecendo soluções inovadoras para determinar a estrutura tridimensional do dossel de plantas arbóreas.

Ao longo dos últimos anos, uma nova ferramenta para a determinação eletrônica do volume de plantas arbóreas vem sendo utilizada. Trata-se do sensor laser LMS. Este sensor foi utilizado por Palacin et al. (2007) e Lee e Eshani (2009) para determinar o volume do dossel de plantas de citros. O mesmo sensor foi utilizado por Chen et al. (2011) com o objetivo de automatizar a pulverização. Escolà et al. (2013) e Gil et al. (2013) também desenvolveram seu protótipo com base neste dispositivo.

2.2. Quantificação do volume do dossel de plantas arbóreas: Método Manual

Para diminuir o volume de calda pulverizado em plantas arbóreas, Morgan (1964) usou, pela primeira vez, o método do TRV (Tree Row Volume), um novo conceito, à época, para se estabelecer o volume de pulverização com base o volume de vegetação por hectare (MAGNO JÚNIOR et al. 2011).

O modelo atualmente usado para determinar o volume foliar do dossel de plantas arbóreas baseia-se no método norte-americano (US-TRV). Este método assume que cada metro cúbico é um espaço potencialmente ocupado pelo dossel de plantas, ou seja, cada fila de plantas pode ser descrita como uma caixa retangular e o volume ocupado pela copa é calculado nessa base. O TRV é calculado tomando-se as distâncias entre linhas, a altura total da planta e a largura da projeção da copa sobre o solo. Uma versão modificada do sistema US-TRV foi adotada, na Europa, para plantas com perfil triangular. Nesse método, o volume de dossel é obtido com base na altura de copa e da meia altura da copa. Esta é a região da planta onde o dossel inicia seu espalhamento, conhecido como TRV, a altura da coroa (HC-TRV) (MANKTELOW; PRAAT (1997)).

O método proposto por Manktelow e Praat (1997) foi chamado de TRV estratificado (HS-TRV). Ele consiste em mensurar o diâmetro do dossel das plantas a cada 0,10 m. Segundo esses autores, mais de 95 % do volume do dossel é computado por este método, o que permite que se obtenha dados confiáveis.

Os parâmetros geométricos e estruturais de plantas arbóreas, como volume e área, são até hoje derivados de mensurações manuais da altura e largura, o que demanda tempo e mão de obra e não caracteriza a desuniformidade do dossel de plantas arbóreas.

2.3. Velocidade de trabalho

Com o objetivo de obter informações acerca do volume do dossel de plantas arbóreas, foram conduzidos trabalhos, com diferentes velocidades de avanço, na cultura do citros. Wei e Salyani (2005) utilizaram uma velocidade de deslocamento do trator 1,6 km h⁻¹ em pera e maçã. Rossell-Polo (2008) utilizou velocidades de 1 a 2 km h⁻¹; Rossell et al. (2009) utilizaram as velocidades de trabalho do trator 0,5; 1 e 1,5 km⁻¹ em planta de Ficus. Em cultura de uva, Llorens et al.(2011) trabalharam com uma velocidade de 4,5 km h⁻¹ e Zhang e Grift (2012) testaram a velocidade de 1,5 km h⁻¹ com forrageiras. Não havendo trabalhos realizados para a cultura do café foi realizada a avaliação do desempenho do LMS nas velocidades apresentadas no Quadro 2.

Raetano (1999) relata que os pulverizadores hidropneumáticos pulverizam de maneira satisfatória plantas de citros com velocidades entre 3,6 e 5,1 km h⁻¹. Os autores concluíram não existir diferença na eficiência de aplicação dentro dessa faixa de velocidade quando empregaram pontas do tipo cônico vazio.

O volume de calda de pulverização pode ser dividido em baixo e alto. Para pulverização de altos volumes, a velocidade de avanço do conjunto tratorizado pode variar de 3 a 5 km h⁻¹. Para pulverizações em baixos volumes, a velocidade pode variar de 2 a 3 km h⁻¹.

3. OBJETIVOS

Objetivou-se com este trabalho avaliar a utilização do LMS como ferramenta para determinar, em tempo real o volume do dossel de plantas arbóreas, em diferentes velocidades de trabalho e caracterizar o dossel de plantas arbóreas.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a concordância entre os métodos:

Determinação do volume do dossel pelos métodos manuais em comparação ao sensor LMS;

Determinação do volume do dossel do dossel pelo método da envoltória convexa em comparação ao sensor LMS;

Determinação da altura e da largura do dossel do dossel pelo método da envoltória convexa em comparação ao sensor LMS;

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização do dispositivo laser

4.1.1. Operando o sistema laser lidar

Segundo o fabricante (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009), o Sistema de Mensuração a Laser (LMS), modelo LMS 111 (FIGURA 1), é um sistema de baixo custo e uso geral utilizado, por exemplo, em sistemas anticollisão e sistemas de vigilância e de acesso monitorado.

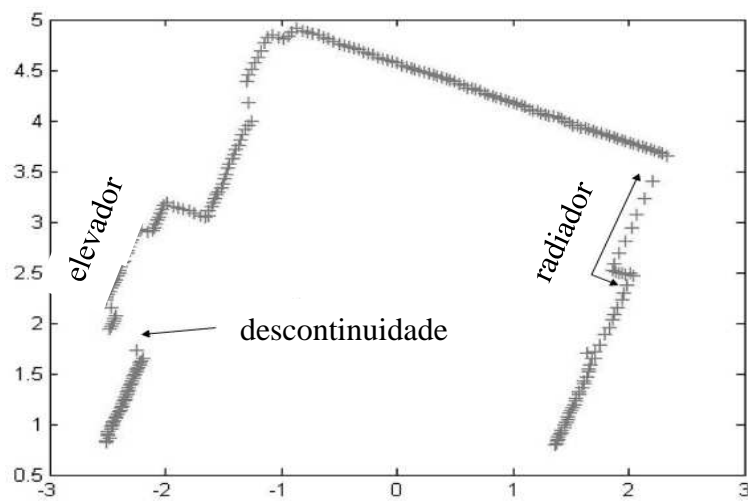


FIGURA 1. Sensor LMS 111. Fonte: SICK AG, (2009).

Trata-se de um sensor de mensuração eletro-óptico, que, sensivelmente, realiza o escaneamento do perímetro, em um plano, por meio da emissão de feixes laser. O LMS mensura o ambiente de forma bidimensional, por meio de coordenadas polares. Uma vez que o feixe laser incida sobre um objeto, sua posição é determinada na forma de distâncias e direções, como exemplificado na Figura 2.



(A)



(B)

FIGURA 2. Mensuração do ambiente de forma bidimensional, utilizando-se um sistema laser (A) e representação do plano de mensuração (B). Fonte: CARAMÉS, (2007).

A amplitude do setor de escaneamento alcançada pelo LMS 111 é de 270° , com alcance máximo de 20 m.

O LMS emite feixes laser de forma pulsada, por meio de um diodo. Uma vez incidido sobre objeto ou pessoa, esse feixe é refletido e detectado por um receptor tipo fotodiodo, como na Figura 3.

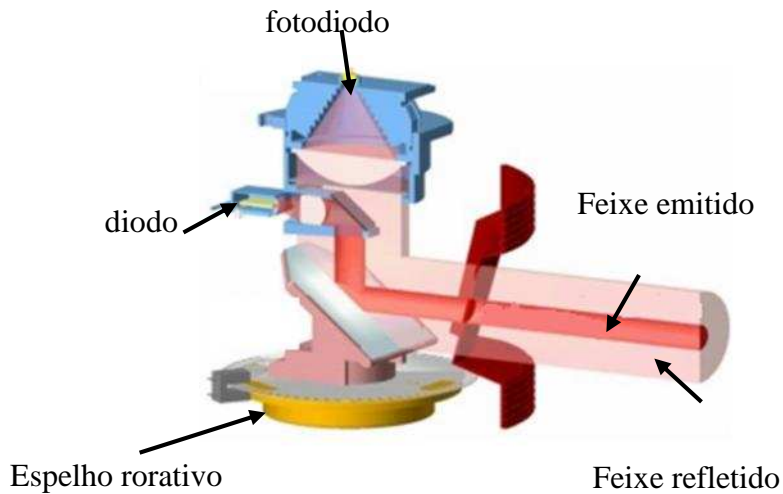


FIGURA 3. Esquema do feixe laser emitido e recebido pelo LMS. Fonte: PALACIN et al, (2006) modificado.

Os feixes laser emitidos são defletidos pelo espelho rotativo realizando um escaneamento semicircular. Por meio de um encode, a resolução angular pode ser selecionada para realização de mensurações a cada 0,25 e 0,50°, com uma frequência de escaneamento de 25 ou 50 Hz.

A distância entre o LMS e o objeto é calculada por meio da determinação, pelo aparelho, da diferença entre o tempo de propagação do feixe emitido até o objeto e o do feixe refletido do objeto até o sensor (FIGURA 4). O mesmo princípio de mensuração é utilizado, de maneira similar, por dispositivos laser de RADAR e trenas eletrônicas manuais.

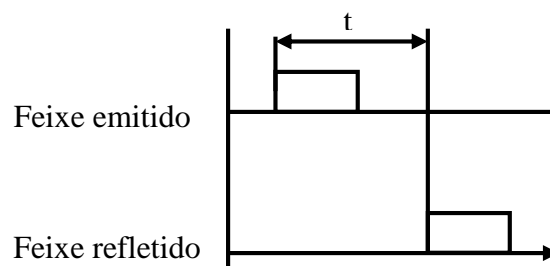


FIGURA 4. Princípio de determinação da distância. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).

Outras características do LMS são descritas na Tabela 1:

TABELA 1. Características do LMS modelo 111

Comprimento de onda	905 nm
Faixa máxima	20,0 m
Resolução angular	0,25°; 0,50°;
Tempo de resposta	53; 26 ms
Alimentação	10 a 30 V
Peso	1,1 kg

Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).

4.1.2. Interação objeto sensor

O sinal recebido a partir de uma superfície branca, perfeitamente difusora, corresponde, por definição, a uma remissão de 100 %. A maioria das superfícies reflete o feixe laser difusamente, em todas as direções. A depender da estrutura e da cor da superfície, essa reflexão irá variar. Superfícies iluminadas refletem o feixe laser melhor que superfícies opacas, pode, assim, as superfícies iluminadas, serem detectadas, de maneira mais fácil, a distâncias maiores. Em superfícies rugosas, parte da energia é perdida, por causa do sombreamento. Como resultado, as distâncias mensuradas podem ser subdimensionadas.

Quanto a objetos menores que o diâmetro do feixe laser emitido, nem toda a energia incidida sobre ele é refletida, ou seja, parte dela é perdida. Por isso, a distância mensurada entre o LMS e o objeto será, também, subdimensionada em relação àquela teoricamente real (FIGURA 5).

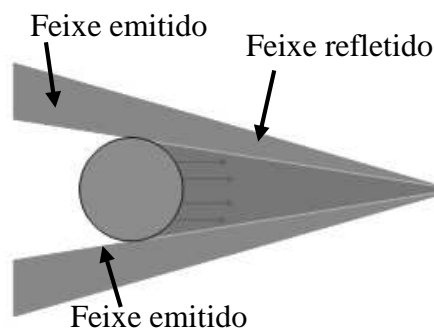


FIGURA 5. Diâmetro do objeto menor que o diâmetro do feixe laser emitido. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009)).

4.1.3. Alcance do dispositivo laser

O alcance de escaneamento do LMS depende da remissão dos objetos a serem detectados. Quanto mais plana a superfície a ser detectada, maior é a reflexão do feixe laser incidente, o que aumenta a possibilidade de o objeto ser detectado a uma maior distância.

Pela Figura 6, é possível observar que, para distâncias maiores que 10 m, o LMS pode detectar objetos a partir de 3 % de remissão. Para distâncias até 20 m, os objetos são detectados somente se apresentarem remissão maiores que 13 %.

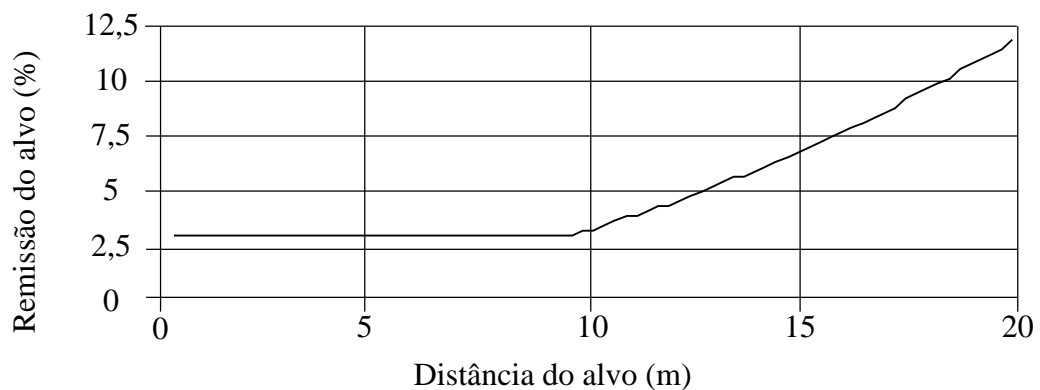


FIGURA 6. Alcance de escaneamento do LMSLIDAR, em função da emissão do alvo.

Fonte: (Sick, Düsseldorf, Germany, 2009).

4.1.4. Relação entre distância e diâmetro dos pontos mensurados

Segundo o fabricante do LMS o diâmetro do feixe laser imediatamente emitido pelo LMS é de 8 mm. Uma vez aumentada a distância entre o LMS e o alvo, o diâmetro do feixe também é aumentado. Sendo assim, segundo dados do fabricante, o diâmetro (distância-dependente) do feixe laser incidente sobre os objetos pode ser calculado de acordo com a Equação 1.

$$DFL=(DS * 0,015)+0,08 \quad (1)$$

em que:

DFL = diâmetro do feixe laser (mm); e,

DS = distância do LMS ao objeto (mm).

Essa característica do diâmetro (distância-dependente) pode ser observada na Figura 7, em trabalho conduzido por Sanz -Cortiella et al., (2011b), em que os alvos foram dispostos a uma distância variando de 1 a 8 m, com os feixes incidindo sobre gabaritos graduados de 1 em 1 mm.

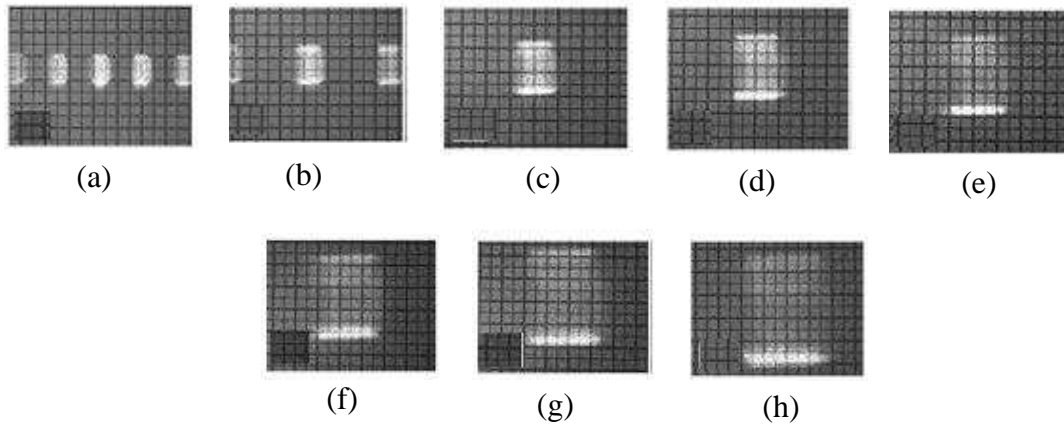


FIGURA 7. Imagem em corte transversal do diâmetro distância dependente do feixe laser emitido sobre gabaritos. As distâncias variaram de 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) 6 (f), 7 (g) e 8m (h).

A distância entre os pontos mensurados também é dependente da resolução angular pré-determinada pelo usuário. Essa resolução é de $0,25^\circ$ ou de $0,50^\circ$. Para maior resolução ($0,50^\circ$), os pontos mensurados serão mais distantes; ao contrário, para a resolução de $0,25^\circ$, menor distância entre os pontos é observada. O espaçamento entre os pontos também é distante-dependente e dado pela tangente da resolução angular pela distância (FIGURA 8).

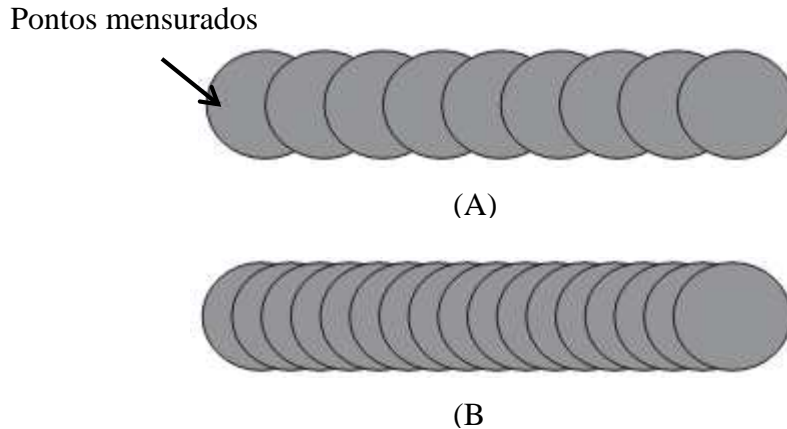


FIGURA 8. Distância entre os pontos mensurados em função da resolução angular determinada pelo usuário. Resolução angular de $0,50$ (a) e de $0,25^\circ$ (b).
Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).

A Figura 9 apresenta o relacionamento entre a distância mensurada (alcance) e o diâmetro do feixe laser emitido, em função da resolução angular pré-definida. Observa-se que, para um alcance de 20 m, selecionada a resolução de $0,25^\circ$; a distância entre as mensurações é de 40 mm, observando-se o mesmo gráfico, nota-se que, pela curva característica do feixe, para uma resolução angular de $0,50^\circ$, este se encontra com um diâmetro de 170 mm.

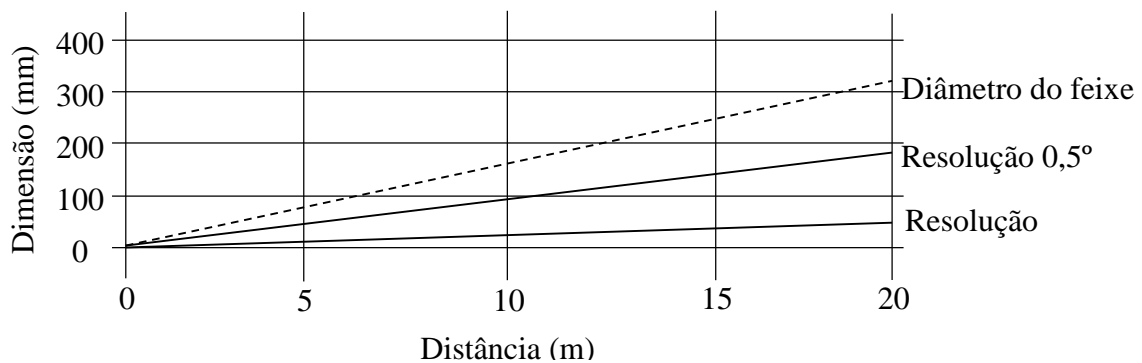


FIGURA 9. Diâmetro do feixe laser em função da distância entre mensurações para alcance de 20 m. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).

Em trabalho conduzido por Sanz-Cortiella et al. (2011b) os autores observaram que o feixe laser emitido pelo LMS não apresentava o formato circular, mas sim retangular, como pode ser observado na Figura 10.

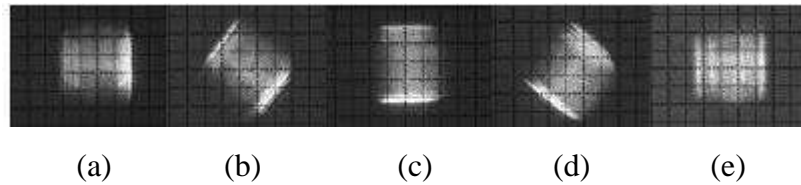


FIGURA 10. Imagem em corte transversal de um feixe laser emitido pelo sensor na direção de 0 (A), 45 (B), 90 (C), 135 (D) e 180° (E). Fonte: SANZ-CORTIELLA et al., (2011b).

4.1.5. Detecção do objeto

Para uma detecção confiável dos objetos, o feixe laser deve incidir completamente sobre ele. Caso o feixe esteja incidindo parcialmente, menor energia será refletida pelo objeto.

Um determinado objeto somente está plenamente dentro do “campo de visão” do feixe laser se este tiver uma dimensão maior que a distância entre dois feixes consecutivos (FIGURA 11).

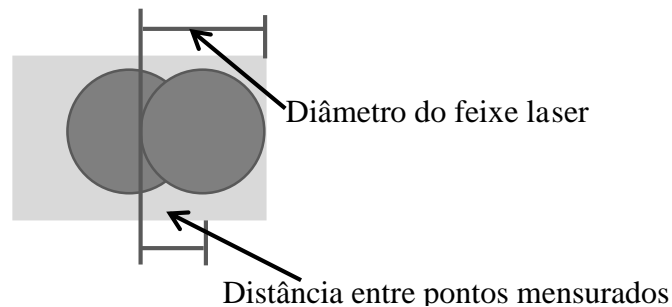


FIGURA 11. Tamanho mínimo do objeto a ser mensurado. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).

Na utilização do LMS para mensurar e caracterizar o dossel de plantas arbóreas, é importante observar que é comum que parte de um mesmo feixe laser emitido atinja elementos da planta, como folhas, galhos e frutos, presentes em um primeiro plano, com o restante do feixe atingindo um segundo plano. Com isso, os dados gerados, de distância mensurada, são resultados de duas correções internas do dispositivo laser, considerando-se que todo o feixe atinge o elemento presente no primeiro plano (FIGURA 12). Quando parte do feixe laser atinge elementos em um primeiro e o restante atinge, simultaneamente, um elemento em um segundo plano, a correção interna realizada pelo

LMS não é totalmente correta e o valor fornecido pelo LMS encontra-se em uma posição intermediária, segundo o fabricante (SICK, 2008).

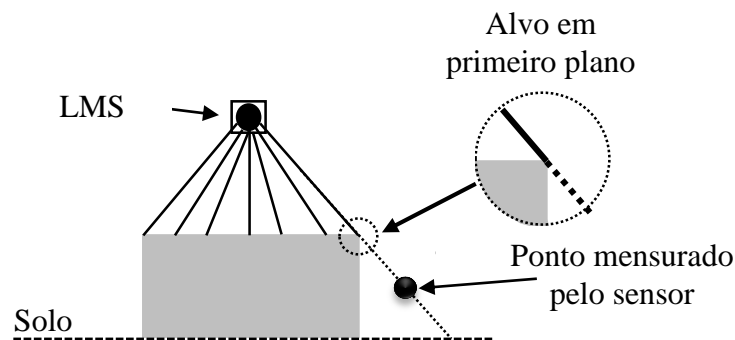


FIGURA 12. Distância mensurada pelo LMS. Fonte: (SICK, Düsseldorf, Germany, 2009).

4.1.6. Interface LMS computador

Para configurar e transmitir dados mensurados, o LMS apresenta três tipos de conexão com os computadores: interface Ethernet, CAN e interface Serial.

4.1.7. Interface Ethernet

Apresenta uma taxa de transferência de dados de 10/100 MBit. Este tipo de interface TCP/IP suporta um fluxo simples (half duplex) ou duplo (full duplex) de transmissão de dados. Esta interface permite ao usuário tanto configurar como extrair os dados de mensuração do sensor. As características do LMS padrão para conexão do tipo Ethernet são:

Endereço de IP: 192.168.0.1

Máscara de Subrede 255.255.255.0

Porta TCP: 2111

4.1.8. Interface CAN

Permite uma taxa de transmissão de dados entre 10 Bit s^{-1} até 1 Mbit s^{-1} . Para sua utilização, o usuário deve primeiro configurar a velocidade de transmissão de dados da CAN bus, além de sua identificação (ID).

4.1.9. Interface Porta Serial

Por meio desta conexão, utilizando um cabo RS-232, é possível configurar o dispositivo laser. Nesse tipo de conexão, a configuração dos parâmetros do sensor está plenamente disponível. As configurações de fábrica para este tipo de interface são:

Taxa de transmissão: 57600 Bit s⁻¹

Bits de dados: 8

Bits de parada: 1

Paridade: sem paridade

Por causa da menor taxa de transmissão da interface serial RS-232, esta não permite a extração dos dados em tempo real. Somente é possível a extração de todos os dados de mensuração em tempo real com interface Ethernet.

4.1.10. Configuração do LMS por envio de mensagens

A configuração e o controle do LMS dão-se por meio de uma sequência de envio e recebimento de mensagens. O sensor em questão responde a uma sequência de mensagens, que podem ser escritas nos formatos ASCII, Hexadecimal (HEX) ou Binário. Após o envio das mensagens, espera-se uma sequência de respostas. Estas também podem estar escritas nos formatos ASCII, Hexadecimal ou Binário. Caso a mensagem enviada esteja escrita no formato ASCII, a resposta deverá estar em ASCII. O mesmo padrão deverá ser observado para as linguagens HEX e Binário.

O acesso ao LMS pode ser realizado pelo usuário de quatro modos: **Operador** (estado base: não é necessária a senha), **Manutenção** (é necessária a senha), **Cliente autorizado** (é necessária a senha) ou **Assistência** (é necessária a senha). Para plena configuração do sensor, é necessário acessar o sensor no modo **Cliente autorizado**, pelo envio da Mensagem 1.

O primeiro subconjunto de caracteres “sMN”, da mensagem 1, e de todas as outras mensagens enviadas ao dispositivo laser, prepara-o para receber uma mensagem. O segundo subconjunto “SetAccessMode” corresponde ao **pedido de acesso** e o par de valores “03” significa que o pedido de acesso será do tipo **Cliente autorizado**. O terceiro subconjunto de caracteres e valores numéricos “**F4724744**” corresponde ao logon para acesso nesta modalidade.

Aceito o usuário no modo Cliente autorizado, a Mensagem 2 é enviada pelo LMS ao computador, com o dígito “1” significa sucesso. Caso o LMS não permita o acesso, a Mensagem 3 será dada como resposta, com o dígito “0” significa erro. O subconjunto de caracteres “SetAccessMode” constitui valores de resposta do laser na linguagem ASCII.

Após o acesso, é necessária a configuração da frequência e da resolução angular de trabalho. Para isso, é necessário o envio da Mensagem 4, que permite a configuração do sensor na frequência de 50 Hz, com resolução angular de 0,50° entre as mensurações.

Seguindo-se o padrão de envio de mensagens, o subconjunto de caracteres “mLMPsetscancfg” informa ao sensor que será configurado, a frequência e a resolução de trabalho. O primeiro subgrupo numérico “1388” determina que o sensor trabalhará na frequência de 50 Hz. O segundo subgrupo “1388” informa a resolução angular de 0,50°. O grupo formado por caracteres e dígitos “FFF92230” determina ao sensor o início da mensuração a -45° e o término em 225°, representado pelo subgrupo de valores “225510”.

Após a realização deste procedimento de configuração, é necessária a sua confirmação, passo realizado por envio ao sensor da Mensagem 5.

A resposta dada pelo LMS será do tipo Mensagem 6. O subconjunto de caracteres “LMPscancfg” indica ao usuário que o sensor está apto a responder à requisição. O primeiro subconjunto numérico “1388” confirma a frequência de trabalho do sensor em 50 Hz, o dígito “1” significa reservado, com o segundo subconjunto “1388” significando resolução angular de 0,50°. Como anteriormente citado, o subconjunto formado por dígitos e caracteres “FFF92230” confirma ao usuário o início das mensurações na posição -45° e seu término em 225°, de acordo com o subconjunto numérico “225510”, realizando assim uma varredura de 270°.

Uma vez configurado, é necessário verificar se o LMS encontra-se apto a desempenhar sua função de determinação de distância, por emissão de feixes laser. Esta verificação é realizada por meio de uma requisição emitida pela Mensagem 7. Esta mensagem requisita ao LMS verificar se há alguma matéria sólida, poeira, gelo, etc., em seu visor, que o impeça de emitir os feixes laser. Esta mensagem realiza a avaliação de seu status.

Quatro possíveis mensagens poderão ser emitidas pelo LMS, em resposta à Mensagem 7. Caso o LMS esteja pronto para realizar as mensurações, a Mensagem 8 é enviada ao computador, indicando ausência de erro, ou seja, nenhum material impede a emissão dos feixes laser, e o dígito “0”, presente após o grupo de caracteres “**LCMstate**”, caracteriza essa situação. Havendo algum tipo de obstrução, em quantidade reduzida, mas

que apresente potencial risco de obstrução, o LMS emitirá a Mensagem 9, com o dígito “1” como indicador. Se o nível de obstrução alcançar um patamar que ocasione obstrução da lente, a Mensagem 10 será emitida, com o dígito “2”. Em caso de erro, por falhas de conexão, a Mensagem 11 será emitida, finalizada com o dígito característico “3”.

Passadas as etapas de configuração e avaliação de estado, por meio das Mensagens 4 e 7, o LMS iniciará as mensurações, após o envio da Mensagem 12. Caso o LMS inicie as mensurações, a Mensagem 13 será enviada ao computador, com o dígito “0”, após o grupo de caracteres “LMCstartmeas”, indicando que o início do procedimento ocorrerá sem erros. Por outro lado, o dígito “1” ao final da mensagem indica que essa etapa não será permitida, como mostra a Mensagem 14.

O término de procedimento da etapa de mensuração é realizado pelo envio da Mensagem 15; aceitando esta determinação, o LMS enviará a Mensagem 16, finalizando o procedimento e o dígito “0” será apresentado, após o grupo de caracteres “sMN LMCstopmeas”. Caso haja problemas no cumprimento desta determinação, o LMS enviará ao computador a Mensagem 17, finalizada com o dígito “1”.

O fluxograma abaixo apresenta o envio de mensagens para configuração e utilização do LMS (FIGURA 13).

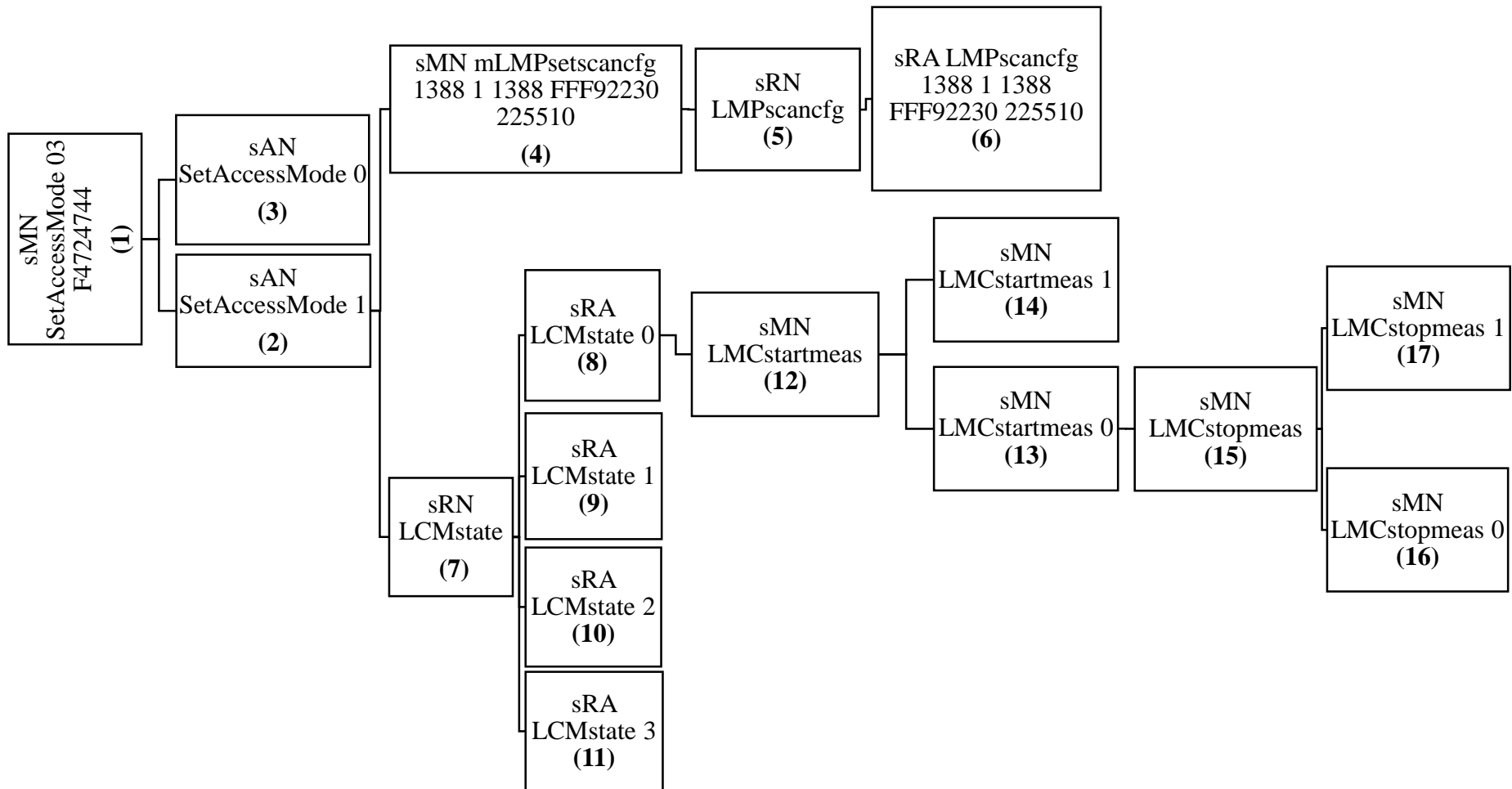


FIGURA 13. Fluxograma de envio de mensagens para configuração e utilização do LMS.

4.1.11. Interpretação dos dados de mensuração disponibilizados pelo dispositivo laser

Abaixo é mostrada uma mensagem enviada pelo LMS, após ser realizada a mensuração, em 2D, de um ambiente qualquer. Pode-se verificar que, para esta resposta, nenhum valor na linguagem ASCII é possível. Sendo assim, todos os dados de distância mensurados são enviados ao computador na linguagem Hexadecimal.

```
sSN LMDscandata 1 1 AF52F2 1 0 3F1A 453 4DA7A567 4DA7FF7E 0 0 0 0 0
1388 168 0 1 DIST1 3F800000 00000000 FFF92230 1388 21D 4E 5D 49 5E 64 67 65
5D 5E 67 68 5F 6A 66 65 6C 73 70 66 5E 74 6D 6B 6C 73 75 7B 7B B1 E4 136 179 189
198 19D 1A9 1A9 1BC 1C7 1DD 1E6 1F8 1F9 204 201 205 201 212 228 22F 24A 261
264 29A 29F 2C0 2BA 2C2 2D6 2DC 2C7 2DA 30A 324 33C 359 380 37D 384 381 *...
60 5B 5A 5C 47 51 56 50 51 0 0 0 0 0 0 (*)
```

*...caso o LMS esteja configurado para uma resolução angular de 0,50° serão enviados 540 valores de mensuração; caso a resolução configurada seja de 0,25°, estarão disponíveis 1080 valores de distância.

O sistema de numeração hexadecimal é uma linguagem computacional escrita na base 16; ou seja, composta por 16 caracteres numéricos e alfabéticos. A maioria dos sistemas digitais processa dados binários, em grupos que são múltiplos de quatro bits, tornando o número hexadecimal muito conveniente, pois cada dígito hexadecimal representa um número binário de 4 bits (FLOYD, 2007).

Para se converter em equivalente decimal um número hexadecimal, primeiramente converte-se o número hexadecimal em binário e, em seguida, o binário em decimal.

Na Equação 2, o valor 1C, em Hexadecimal, corresponde ao valor 28, em decimal.

$$1C_{16} = \overbrace{0001}^1 \overbrace{1100}^C = 2^4 + 2^3 + 2^2 = 16 + 8 + 2 = 28_{10} \quad (2)$$

Desta forma, pode-se, então, converter os valores extraídos do LMS, disponibilizados no formato Hexadecimal, para valores facilmente interpretáveis, ou seja, para o formato decimal (coordenadas reais).

Do exemplo acima, o primeiro subgrupo de caracteres **sSN** ou **SRA** é um tipo de comando de valor ASCII, indicador de que os valores a seguir advêm do dispositivo laser.

O segundo subgrupo “LMDscandata” indica que os valores apresentados a seguir são de mensurações do ambiente.

4.2. Programa computacional MATLAB

O programa computacional MatLab (The Mathworks Inc, Natick, Massachusetts) é uma poderosa ferramenta computacional para cálculos de engenharia. O nome MATLAB vem da junção das palavras MATrix LABORatory, porque o sistema foi desenvolvido para realizar cálculos de matrizes de maneira simples (HAHN; VALENTINE, 2010).

4.3. Interação e transferência de dados entre o LMS e o programa computacional MATLAB

Pela facilidade de interpretação e escrita, dentro do ambiente computacional MATLAB, foi utilizada a linguagem ASCII.

4.3.1. Configuração do LMS por envio de mensagens

A comunicação feita entre o computador e o LMS foi realizada com a conexão Ethernet, que permitiu a transferência de dados em tempo real. Primeiramente, foi necessária a criação de um objeto “t”, que, no entendimento do programa computacional, correspondeu ao LMS, passível de configuração. Deste modo, uma porta de comunicação entre o objeto “t” e o programa computacional foi aberta, por envio da Mensagem 18.

```
t = tcpip ('169.254.146.116', 'remoteport', 2112, 'localport', 2112);      (18)
```

A Mensagem 19 foi necessária para a habilitação do terminador de todas as mensagens necessárias para a configuração e utilização do LMS.

```
set(t,'terminator',3)                                                  (19)
```

O valor 3, como determina o fabricante, é o valor amarrador (string), que determina o término de envio de cada uma das mensagens de configuração, início e término das operações de mensuração realizadas pelo LMS.

Foi necessário, também, configurar o número total de bytes, que seriam armazenados na memória intermédia de entrada durante uma operação de leitura. Esta etapa foi realizada por envio da Mensagem 20.

set(t,'InputBufferSize',3000) (20)

A Mensagem 21 foi enviada ao sensor com o objetivo de especificar o número total de bytes a serem enfileirados na memória intermédia de saída.

set(t,'OutputBufferSize',3000) (21)

O LMS continuamente realizava uma verificação da disponibilidade de dados de mensuração, procedimento configurado por envio da Mensagem 22. Caso o procedimento de coleta de dados falhasse, uma mensagem de erro seria emitida.

set(t,'ReadAsyncMode','continuous') (22)

O tempo máximo para completar uma operação de leitura ou gravação, em espera, dos dados de mensuração, foi determinado em 1 minuto, sendo configurado pela Mensagem 23.

set(t,'Timeout',60) (23)

Uma vez configurado o modo de comunicação com o LMS, a mensagem fopen (t) era sempre enviada para se realizar o procedimento de comunicação, propriamente dito, entre o LMS e o programa computacional.

A partir deste momento, deu-se início às etapas de configuração e utilização do LMS. Para a realização da configuração, foi necessário ter o acesso tipo Cliente, pedido realizado pela Mensagem 24

fwrite(t,[2'sMNSetAccessMode03F4724744'3]) (24)

A frequência e a resolução das mensurações foram configuradas para 50 Hz e 0,50° de resolução angular entre as mensurações. Esta configuração foi realizada por envio da Mensagem 25.

fwrite(t,[2'sMN mLMPsetscancfg +5000 +1 +5000 -450000+2250000'3]) (25)

O pedido de confirmação do recebimento e entendimento da mensagem por parte do LMS foi realizado por envio da Mensagem 28.

fwrite(t,[2'sRNLMPscancfg3]) (26)

A Mensagem 27 foi utilizada para a verificação de alguma possível obstrução na lente do sensor, que pudesse impedi-lo de realizar o procedimento de mensuração.

`fwrite(t,[2'sRNLCMstate'3])` (27)

Após realizar os procedimentos de configuração e não havendo ocorrência de falhas, o envio da Mensagem 29 foi o procedimento utilizado para requisitar o início do procedimento de mensuração.

`fwrite(t,[2'sMNLMCstartmeas1'3])` (29)

Após o modo de mensuração ser iniciado, o LMS apresenta um delay até alcançar o status de "Pronto para mensuração"; sendo assim, um período de dez segundos foi estabelecido para que o procedimento seguinte, requisição dos dados de mensuração, fosse realizado, por meio da Mensagem 30.

`fwrite(t,[2'sENLMDscandata1'3])` (30)

A Mensagem 31 foi utilizada para encerrar o procedimento de mensuração.

`fwrite(t,[2'sMNLMCstopmeas'3])` (31)

O corte da comunicação entre o LMS e o programa computacional foi realizado pela mensagem `fclose (t)`.

4.3.2. Conversão do dados vindos do LMS

Por meio da Equação 3, auxiliada pelo comando `hex2dec`, fornecido pelo programa computacional, foi possível a transformação dos dados de mensuração do LMS, do padrão hexadecimal para o padrão decimal.

$$V_m = \frac{\text{hex2dec}(v_h)}{1000} \quad (3)$$

em que:

V_m = valores calculados em decimal; e,

v_h = valores medidos em hexadecimal.

4.4. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas

Com o objetivo de determinar o desempenho do LMS, modelo 111, em conjunto com o programa computacional MatLab, em determinar o dossel de plantas arbóreas, o seguinte experimento foi realizado nas dependências do Laboratório de Mecanização Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa-UFV.

O LMS foi acoplado a uma ponte tipo trilho, com capacidade de controle da velocidade, a uma altura (A) de 0,97 m e a 1,52 m de distância da linha de plantas - eixo central do dossel (D). A estrutura permitiu a movimentação vertical do sensor LMS ao longo da barra (eixo Z), impulsionado por um motor elétrico de 0,735 kW de potência. Na saída do motor elétrico, está acoplado um mecanismo redutor de velocidade, composto por corrente e engrenagens, que se move sobre cremalheiras fixadas ao longo da estrutura e aciona o suporte contendo o dispositivo laser, em velocidades constantes. O acionamento do motor foi possível graças ao acoplamento de um inversor de frequência vetorial trifásico, marca Siemens, modelo MICROMASTER 420. O acoplamento do inversor permitiu controlar várias funções do motor, como acionamento nas diferentes velocidades, paradas, inversão do sentido de rotação e programação dos tempos de aceleração (3 segundos) e desaceleração (2 segundos) do conjunto. Todas as funções foram monitoradas por controles, localizados no painel do inversor de frequência (FIGURA 14).

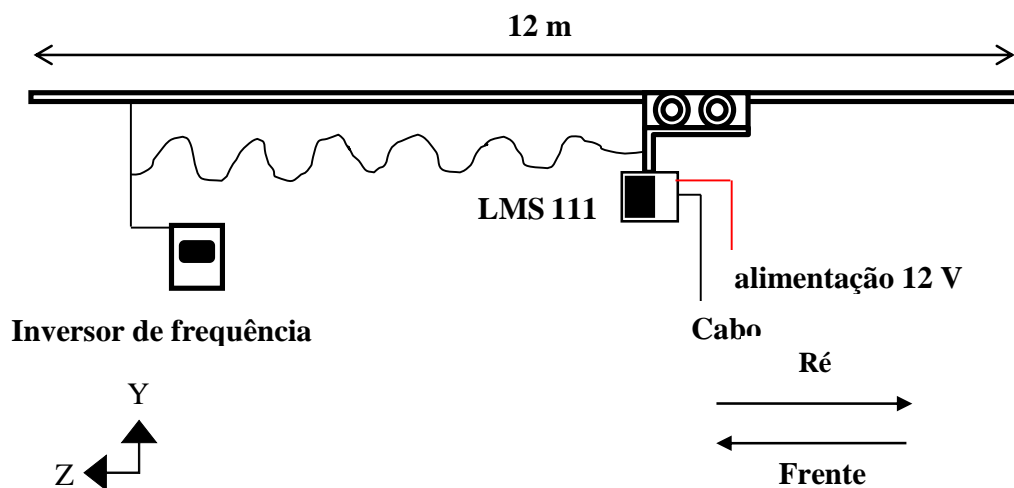


FIGURA 14. Desenho esquemático do LMS acoplado o trilho.

O LMS foi alimentado com 12V, convertidos, por uma fonte conversora alimentada com 110 V. A transmissão dos dados para o computador foi realizado por meio de um cabo de dados tipo Ethernet (FIGURA15).

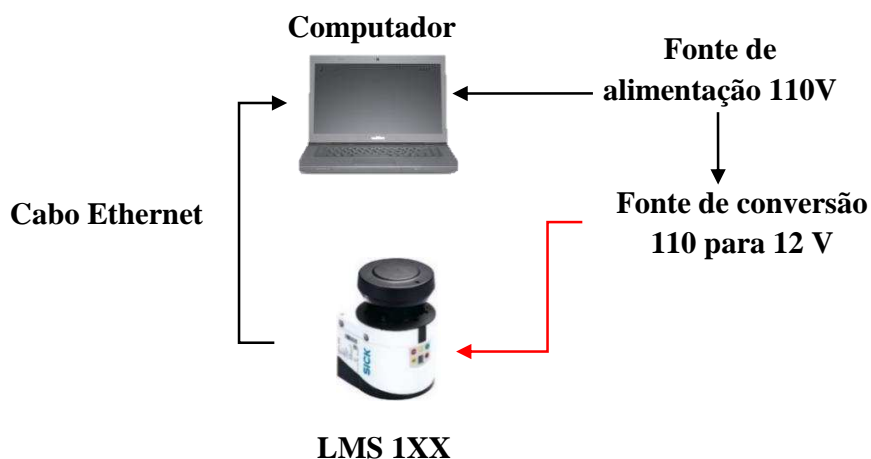


FIGURA 15. Conexão entre os elementos utilizados no procedimento de mensuração.

A mensuração do volume do dossel foi realizado em três plantas de café, alinhadas espaçadas uma das outras de 2,10m. As velocidades de deslocamento do LMS acoplado trilho foram de 0,5; 1; 2; 3; 5 e 6 km h⁻¹.

O acoplamento do LMS ao trilho foi utilizado para a realização do estudo de desempenho do sistema com velocidade constante e percurso pré-determinado.

4.4.1. Determinação do volume de plantas arbóreas utilizando métodos manuais

4.4.1.1. Método de determinação do volume do dossel de Whitney

A medição manual do volume de plantas foi realizada em laboratório, com a metodologia de mensuração de volume de Whitney (WHEATON et al. 1995; TUMBO et al. 2002), conforme Equação 4.

$$V_w = \frac{\pi}{4} R D_2 A_T \left[1 - \left(\frac{D_E}{A_T} \right)^3 \right] \quad (4)$$

em que:

V_w = volume do dossel, (m³);

A_T = altura total do dossel, (m);

D_E = distância entre plantas na linha, (m);

R = raio máximo do dossel perpendicular à linha da cultura, (m); e,

D_2 = diâmetro máximo do dossel paralelo à linha da cultura, (m).

4.4.1.2. Método de determinação do volume Prolato

A segunda medição manual foi realizada, considerando-se o volume do dossel como um esferoide prolato, conforme a Equação 5.

$$V_p = \frac{\frac{\pi R^2}{4} \left(\frac{2(A_T - A_M)}{3} + (A_M - A_s) \right)}{2} \quad (5)$$

em que:

V_p = volume do dossel, (m³);

R = raio máximo do dossel perpendicular à linha de plantio, (m);

A_T = altura total do dossel, (m);

A_M = altura até o ponto de máximo diâmetro do dossel, (m); e,

A_s = altura do solo até a saia da planta, (m).

A Figura 16 apresenta um desenho esquemático dos pontos de mensuração manual do dossel das plantas arbóreas, para comparação com os pontos do método de mensuração eletrônica, realizada pelo LMS.

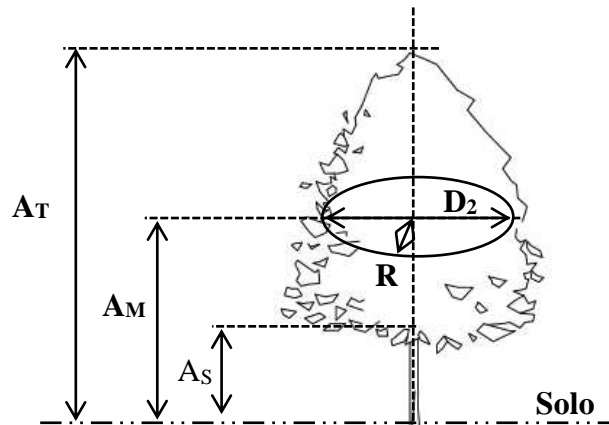


FIGURA 16. Esquema dos pontos de mensuração do dossel de plantas arbóreas, considerando-se o método de Whitney e o dossel como um objeto de volume prolato (Vista Frontal).

4.4.1.3. Método de determinação da altura estratificada

Também foi utilizada a metodologia de cálculo manual, denominada, por MANKTELOW e PRAAT (1997), como método da altura estratificada (método das áreas). O método consistiu em medir, a cada 20 cm, a distância do eixo central da planta (tronco principal) até a extremidade (raio). Assim foi determinado, a cada 0,20 m, a área do semicírculo (EQUAÇÃO 6).

$$V_a = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \mu r_i^2 L_i \quad (6)$$

em que:

V_a = volume do dossel pelo método das áreas, (m^3);

r_i = distância entre o eixo central e o ponto mais externo, a cada 0,20m;

L_i = distância entre as fatias, (m).

4.5. Caracterização do dossel de plantas arbóreas, utilizando o LMS

4.5.1. Representação do dossel de plantas arbóreas pelo método de nuvem de pontos, utilizando o LMS

O perfil do dossel das plantas foi gerado com os pontos interceptados pelo LMS, incididos sobre as folhas, como exemplificado na Figura 17.

Os valores de distância mensurados no padrão hexadecimal foram convertidos para decimal, antes de serem manipulados.

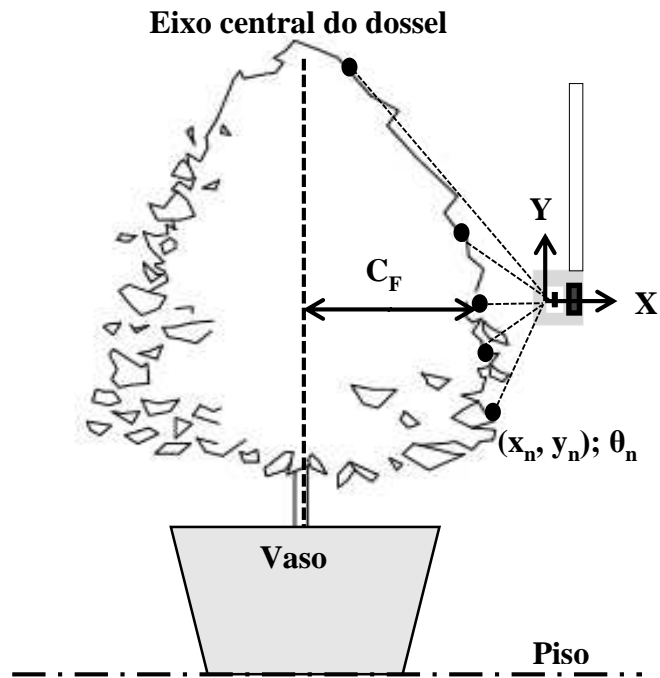


FIGURA 17. Procedimento de mensuração do LMS.

Uma vez obtidos os pontos, que originalmente se encontravam em coordenadas polares, estes foram convertidos a coordenadas cartesianas, por meio das Equações 7 e 8.

$$x_i = D - d_i \sin(\theta_i) \quad (7)$$

$$y_i = A + d_i \cos(\theta_i) \quad (8)$$

em que:

x_i = abscissas dos pontos interceptados (m);

y_i = ordenadas dos pontos interceptados (m);

D = distância entre o LMS e o eixo central do dossel em (m);

A = altura do LMS em relação ao solo, (m);

d_i = distância mensurada pelo LMS, (m); e,

θ_i = ângulo de escaneamento.

4.5.2. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método das áreas

Uma vez que o perfil de uma fatia simples mensurada pelo LIDAR foi conhecido, a área superficial, perpendicular à linha de percurso do dispositivo laser foi obtida pela Equação 9, aplicando-se o método de coordenadas superficiais descrito por GHILANI e WOLF (2012).

$$A_S = \frac{1}{2} [x_0(y_n - y_1) + x_1(y_0 - y_2) + x_2(y_1 - y_3) + \dots + x_n(y_n - y_0)] \quad (9)$$

em que:

A_S = área superficial perpendicular ao eixo (m^2);

(x_0, y_0) = coordenadas cartesianas do ponto mais alto do dossel; e,

(x_n, y_n) = coordenada cartesiana do ponto mais baixo do dossel.

O volume do dossel foi calculado, somando-se o volume de cada fatia simples, de acordo com a Equação 10, em que todas as fatias no comprimento total da linha de trajetória foram incluídas.

$$V_T = \sum_{i=1}^{A_T C_F^{-1}} (A_S)_i C_F \quad (10)$$

em que:

V_T = volume total do dossel (m^3);

A_S = área superficial perpendicular ao eixo (m^2);

C_F = comprimento da fatia, (m); e,

A_T = comprimento total da linha mensurada (m).

4.5.3. Caracterização da nuvem de pontos, correlação entre número de impactos e área foliar do dossel de plantas arbóreas

Para o estudo de correspondência entre o número de impactos (pontos mensurados) e área foliar do dossel a segunda planta foi subdividido em três terços (inferior (I), médio (M) e superior (S)), que, por sua vez, foram divididos, cada um, em duas profundidades (interno (IT) e externo (E)). Como referência para esta divisão foi

utilizada uma placa com as dimensões 1,0 x 0,5 m (LxA), disposta anteriormente à primeira planta (FIGURA 18).

Eixo central do dossel

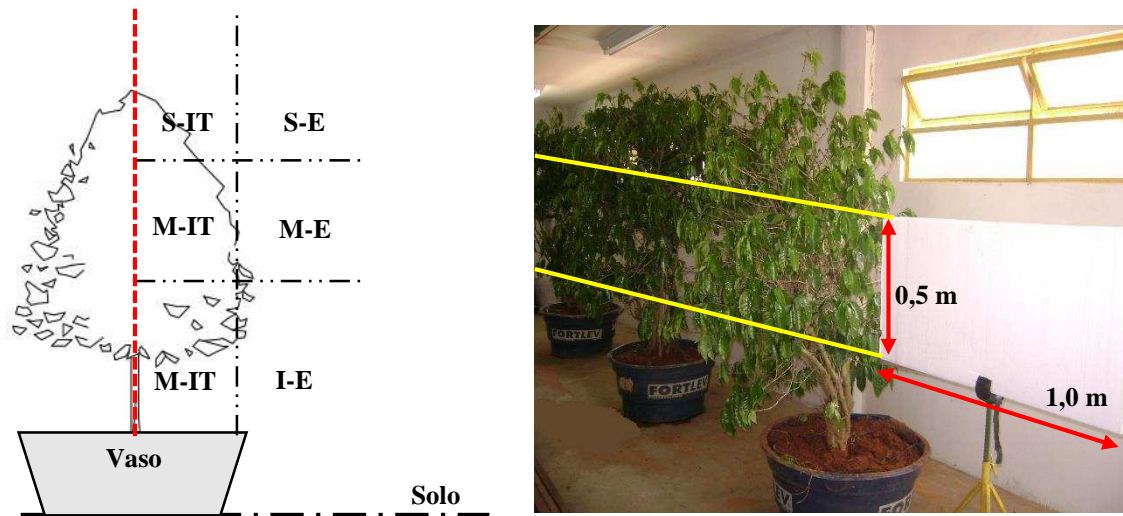


FIGURA 18. Divisão do dossel em partes para análise de correlação.

De cada uma das seis partes do dossel foram retiradas todas as folhas. A área foliar de dessas foram medidas utilizando-se com um medidor de área foliar portátil manual, modelo CI-202 (FIGURA 19).



FIGURA 19. Medidor de área foliar modelo CI-202.

Para realização do estudo de correlação, a nuvem de pontos correspondeu apenas àquela identificada como do dossel, sendo eliminada, portanto, a correspondente ao vaso.

4.6. Determinação da altura e da largura do dossel de plantas arbóreas, utilizando o LMS

Uma vez que o perfil foi gerado, foi avaliada a capacidade do método empregado para determinar a altura (A_m) e a largura do dossel (L_m), por meio da análise da nuvem de pontos 3D gerada, com a altura sendo determinada pela Equação 11.

$$A_m = \underset{i=1}{\overset{n}{\text{Max}}} \left\{ \underset{k=1}{\overset{m}{\text{Max}}} (y_i) \right\} \quad (11)$$

em que:

A_m = altura mensurada do dossel, (m); e,

Max = máximo valor da coordenada y;

i = primeira fatia correspondente ao dossel da planta arbórea;

n = última fatia corresponde ao dossel da planta arbórea.

Para cada fatia, o máximo valor de y foi armazenado e, dentre eles, o maior valor encontrado foi considerado como o que representava a altura do dossel de cada planta.

A distância entre fatias, para cada uma das velocidades avaliadas, foi determinada, utilizando-se como referência uma placa de dimensões 1,0 x 0,5 m (comprimento x largura), disposta à frente do sensor. Foram realizadas cinco passadas consecutivas para cada uma das velocidades pré-determinadas. (FIGURA 20).

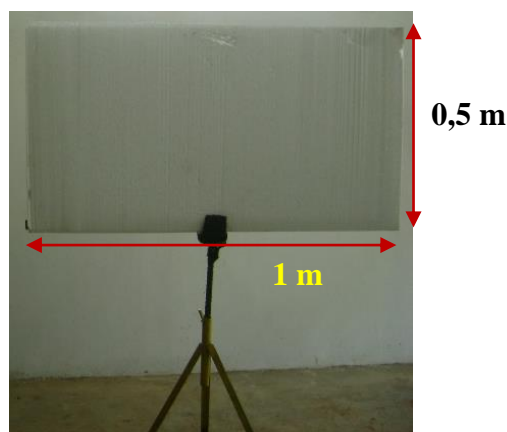


FIGURA 20. Placa utilizada como referência para determinação da distância entre fatias.

A largura mensurada do dossel foi determinada pela diferença entre a posição da primeira e da última fatia ($i=n$) representativa do dossel, multiplicada pela distância entre as fatias (d_f), representada pela Equação 12.

$$L_m = (F_{i=n} - F_{i=1}) d_f \quad (12)$$

em que:

L_m = largura mensurada do dossel, (m);

F = posição da fatia; e,

d_f = distância entre fatias, (m).

4.7. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método da envoltória convexa

De posse dos dados de nuvem de pontos (arquivo de dados de uma medição tridimensional obtida através do escaneamento a laser), aplicou-se a função Convex hull (envoltória convexa) sobre os pontos correspondentes a cada uma das plantas, para obtenção de seu volume da árvore.

A envoltória convexa de um conjunto finito de pontos é o menor poliedro (3D) convexo que contém todos os pontos em seu interior; mais precisamente, é a interseção de todos os poliedros que contêm todos os pontos.

5. Delineamento Estatístico

O trabalho foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado. Três plantas foram utilizadas, as mesmas foram utilizadas como repetição. Os resultados obtidos foram submetidos a análise de variância e correlação. A análise de correlação dos números de impactos foi feita em função da área foliar.

As médias dos resultados foram comparadas pelo teste de agrupamento de SCOTT-KNOTT (1974) para avaliar a utilização do método de sensoriamento para determinação do volume do dossel, a 5% de probabilidade.

6. RESULTADOS E DISCUSÃO

6.1. Configuração do LMS 111 por meio do envio de mensagens

Abaixo, é apresentada parte de uma mensagem enviada pelo LMS ao computador, correspondente aos valores mensurados, referentes a uma fatia, pelo LMS:

An event occurred.

> - A write operation occurred.

< - A read operation occurred.

1 Recording on 09-Nov-2013 at 11:29:06.965. Binary data in big endian format.

2 > 6 ascii values.

*IDN?

3 < 2189 ascii values.

```
sSN LMDscandata 1 1 AF52F2 1 0 36E0 23E 106224E8 1C958497 0 0 0 0 0 1388
168 0 1 DIST1 3F800000 00000000 FFF92230 1388 21D 74 65 72 6A 6F 7A 66 66 74
77 7C 7F 7B 6F 77 6A 70 7B 71 7D 82 84 78 7A 7A 72 73 82 85 8B 7A 90 93 87 7F 8F
82 97 A1 A3 A7 93 96 AD AA B2 BA C1 C3 D1 D8 D5 D6 D8 E1 EE 110 1F9 2CB 636
3FC 36B 351 34F 355 34E 344 339 2AF 1C2 16C 114 17A 215 31E 325 38D 434 438
4A3 680 675 672 66E 4E1 58A 67F 677 66E 675 680 681 679 673 676 67D 676 67D
67B 67F 688 689 68C 67F 687 68B 689 687 689 68E 68E 692 694 697 6A3 6AD 6B3
6A3 6B2 6AE 6C0 6B6 6C0 6C5 6C6 6D4 6D2 6D4 6D6 6EF 6E3 6EC 6FA 6FA 6FD
711 70B 720 71E 72C 72B 732 744 74C 74E 757 762 770 780 784 77F 790 8F4 8FE 908
927 945 947 95E 977 993 9B9 9C5 9EA 9F4 A1D A2C A4A A65 A88 ... 76 5F 70 5F
70 0 0 0 0 0 0
```

É possível verificar a validade da metodologia de configuração do LMS por envio de mensagens pelo programa computacional MATLAB.

O conjunto de caracteres e valores numéricos FFF92230 indica que o início da leitura deu-se a -45° , com uma frequência de mensuração de 50 Hz, confirmado pela primeira sequência de valores 1388. A segunda sequência de valores 1388 indica que a resolução de trabalho seguiu o que foi predeterminado, ou seja, $0,50^\circ$ de resolução angular.

6.2. Volume de plantas arbóreas, utilizando o método manual

No Quadro 1, são apresentados os valores de volume do dossel das três plantas usadas neste trabalho. Observa-se que, independentemente do método utilizado, todos os três identificaram a segunda planta (P2) como a de maior e a terceira planta (P3) como a de menor volume de folhas.

QUADRO 1. Volume do dossel (m^3) de plantas arbóreas, utilizando diferentes métodos (V_w – Volume de Whitney, V_p Volume Prolato, V_a Volume pelo método das áreas)

Plantas	V_w	V_p	V_a
P1	0,813	0,951	0,822
P2	1,129	1,175	0,921
P3	0,725	0,921	0,751
	0,889	1,016	0,831

O número de pontos referenciados, nos três métodos propostos, é maior do que aqueles utilizados no TRV que são: altura, distância entre linhas e largura do dossel, podendo, assim implicar sua possível rejeição por parte do produtores. Por outro lado a utilização de métodos que individualizam o volume do dossel promovem maior confiabilidade dos dados, subsidiando informações para a recomendação do volume de calda individualizado.

Deve-se ressaltar também a necessidade de individualização do dossel de plantas arbóreas, com o objetivo de reduzir o volume de pulverização devido a desconsideração do espaço presente entre plantas.

A quantificação do volume do dossel de plantas arbóreas, utilizando os métodos manuais propostos, mostrou ser uma ferramenta útil para coleta de dados, com vistas à recomendação do volume de pulverização, pois individualizam o dossel e não tratam a linha de plantio como uma parede de folhas.

Segundo Zhu et al. (2006), menos de 30 % do volume pulverizado atinge o alvo, em parte, por causa da má caracterização do dossel de plantas arbóreas. O método atualmente utilizado (TRV) superestima o volume de calda a ser pulverizado, uma vez que considera as plantas como um alvo homogêneo, uma parede de folhas. Este método desconsidera os espaços presentes entre um dossel e outro, além de sua heterogeneidade. Faz-se, assim, necessária a utilização de métodos de quantificação manuais que individualizem o dossel, considerando sua heterogeneidade.

O método para determinação do volume do dossel, de forma estratificada, foi utilizado por Mankteleon e Praat (1997). Comparando-se o método estratificado com o TRV os autores determinaram um volume 59 % menor, para a cultura da maçã. O procedimento de estratificação a cada 0,2 m aumenta a precisão do processo, justificando, assim, esta diferença.

Mesmo sendo considerado mais preciso, o método de determinação do volume do dossel de forma estratificada é considerado o mais trabalhoso dos três, exigindo maior qualificação de técnicos e aplicadores (MANKTELEON e PRAAT, 1997).

Comparando ao método de determinação do volume de Whitney e o método do volume prolato, Tumbo et al. (2002) concluíram os dados obtidos por esses dois métodos apresentam uma forte correlação.

As médias de volume do dossel obtidos pelo método de Whitney, são menores do que os obtidos pelo método do volume prolato (QUADRO 1). Essa diferença segundo Tumbo et al. (2002) ocorre em razão de método de Whitney utilizar dois pontos de referência para a medição do diâmetro: paralelo e perpendicular à linha de plantio da cultura. No método do volume prolato, contudo, as medições do diâmetro são realizadas paralelamente à linha de plantio. Esses autores ainda recomendam uma integração entre os dois métodos, de forma a abranger todas as dimensões possíveis de uma planta.

6.3. Volume do dossel de plantas arbóreas pelo método das áreas

A Figura 21 apresenta a sequência de confecção da área transversal (fatia individual) utilizada para determinação do volume do dossel. Na Figura 21A, observa-se um conjunto de pontos representativo de uma fatia qualquer mensurada pelo LMS. A Figura 21B apresenta esses mesmos pontos de forma interligada. A Equação 7 foi utilizada para a mensuração da área, destacada em verde, apresentada na Figura 21C.

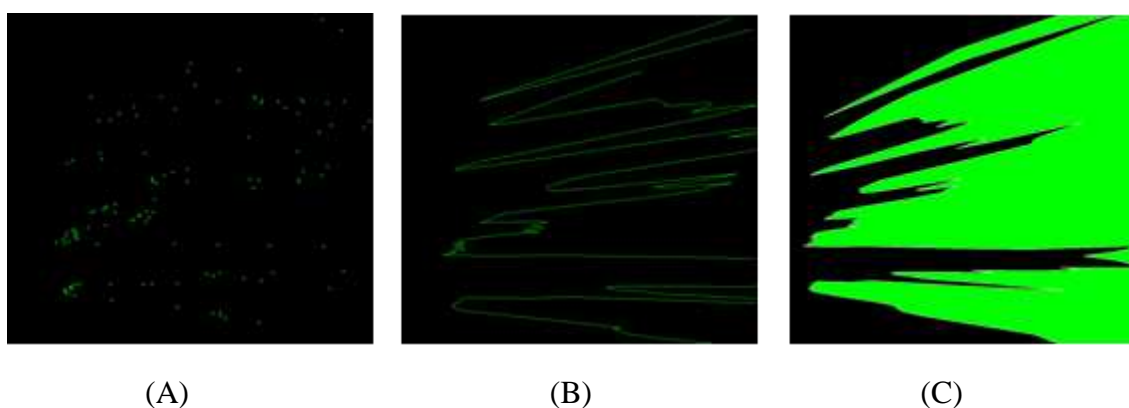


FIGURA 21. Sequência de confecção do polígono: método das áreas, para cálculo do volume foliar do dossel de plantas arbóreas. Nuvem de pontos original de uma fatia (A), interligação entre os pontos de uma fatia (B), área mensurada (C).

A estratégia de mensuração adotada considerou como área válida, passível de ser quantificada, aquela em que as distâncias compreendidas entre o LMS e o eixo central das plantas não ultrapassassem 1,52 m. O eixo central a como referência, pois essa é a distância máxima efetiva de ação dos pulverizadores utilizados em culturas arbóreas.

No Quadro 2 são apresentados os valores dos volumes determinados utilizando-se o LMS.

QUADRO 2. Volume do dossel de plantas arbóreas (m³) em função da velocidade de deslocamento

Plantas	Velocidade (Km h ⁻¹)					
	0,5	1	2	3	5	6
P1	0,748	0,736	0,686	0,736	0,712	0,604
P2	0,948	0,924	0,886	0,866	0,902	0,724
P3	0,788	0,758	0,754	0,768	0,852	0,936
Média	0,831	0,806	0,775	0,790	0,822	0,755

Através do Quadro 3 observa-se que é possível trabalhar dentro do intervalo de velocidades estudados sem influenciar o processo de mensuração, pois os mesmos se encontram dentro de um mesmo grupo.

QUADRO 3. Volume do dossel de plantas arbóreas (m³) em função da velocidade de deslocamento e métodos de manuais

Métodos Manuais			Velocidade (km h ⁻¹)					
V _W	V _P	M _a	0,5	1	2	3	5	6
0,889a	1,1016a	0,831a	0,831a	0,806a	0,775a	0,790a	0,822a	0,755a

(*) Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.
 (**) V_W – Volume de Whitney, V_P Volume Prolato, V_a Volume pelo método das áreas.

Tomando-se como referência a velocidade de deslocamento de 3 km h⁻¹ (Quadro 2) e, considerando-se os valores obtidos com o método de Whitney, com o método do volume prolato (Quadro 1) e com o método das áreas, foi possível determinar a diferença entre o volume medido manualmente e o medido pelo LMS.

No Quadro 4, são apresentados os valores, em percentagem, da diferença entre os valores mensurados pelo LMS e os mensurados pelos métodos manuais. O sinal

negativo significa que o volume mensurado pelo LMS foi menor que o medido manualmente.

A metodologia de medição do volume pelo método prolato realiza apenas a medição do diâmetro do dossel paralelamente à linha de plantio, já o método de Whitney realiza a medição do diâmetro do dossel paralela e transversalmente à linha de plantio, ou seja, o número de pontos mensurados pelo método de Whitney é maior, caracterizando melhor o dossel. Desta forma a diferença entre os valores obtidos pelo método prolato e a obtida com o LMS são maiores, chegando à diferença máxima de 38 %.

De modo geral, as maiores diferenças de volume foram observadas quando a velocidade de deslocamento ultrapassou 5 km h^{-1} , este valor indica que a utilização do LMS em maiores velocidades afeta a precisão. Uma diferença entre o volume medido manualmente e o mensurado pelo LMS de 14 % foi observada por Lee e Ehsani (2009), em trabalho com citros.

As menores diferenças percentuais podem ser observadas entre os volumes mensurados pelo LMS e os medidos pelo método manual (M_A). Os resultados justificam-se, pois, o M_A assemelha-se ao método de áreas proposto para o cálculo do volume do dossel eletronicamente, que realiza uma espécie de varredura do dossel. A diferença deve-se ao fato de que o LMS realiza a varredura verticalmente e o M_A realiza a varredura horizontalmente.

QUADRO 4. Diferença percentual (*) entre o volume mensurado pelo LMS e pelos métodos manuais

Método	Planta	Velocidade (km h ⁻¹)					
		0,5	1	2	3	5	6
		Diferença percentual (%)					
V _p	P1	-21,35	-22,61	-27,87	-22,61	-25,13	-36,49
	P2	-19,32	-21,36	-24,60	-26,30	-23,23	-38,38
	P3	-9,01	-12,47	-12,93	-11,32	-1,62	8,08
V _w	P1	-9,11	-10,57	-16,65	-10,57	-13,49	-26,61
	P2	-16,03	-18,16	-21,52	-23,29	-20,11	-35,87
	P3	-5,63	-9,22	-9,70	-8,02	2,04	12,10
M _a	P1	-7,79	-10,46	-16,55	-10,46	-13,38	-26,52
	P2	2,93	0,33	-3,80	-5,97	-2,06	-21,39
	P3	-9,43	-12,87	-13,33	-11,72	-2,07	7,59

* Diferença percentual = (volume medido pelo LMS – volume manualmente/ volume manualmente) * 100. ** V_p = Volume prolato; V_w = Volume Whitney; M_A = Método das áreas.

A capacidade do LMS de identificar os espaços vazios presentes no dossel das plantas arbóreas explica a diferença da metodologia eletrônica de mensuração, em relação aos métodos manuais.

6.4. Determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método da envoltória convexa

O método da envoltória convexa, como demonstrado no Quadro 5, deve ser utilizado em maiores velocidades, com o objetivo de se determinar o volume do dossel de plantas arbóreas, visando à pulverização de agrotóxicos.

QUADRO 5. Diferença percentual (*) entre o volume mensurado pelo LMS e o medido pelos métodos manuais

Método	Planta	Velocidade (km h ⁻¹)					
		0,5	1	2	3	5	6
		Diferença percentual (%)					
V _P	P1	4,05	7,21	13,51	-28,53	-37,99	-24,32
	P2	12,31	17,42	29,33	-7,26	-17,47	-29,38
	P3	29,33	20,09	39,72	36,26	-8,78	-15,70
V _w	P1	21,73	25,42	32,80	-16,39	-27,45	-11,47
	P2	16,90	22,21	34,61	-3,47	-14,10	-26,50
	P3	34,09	24,52	44,87	41,28	-5,42	-12,60
M _A	P1	20,50	24,15	31,45	-17,23	-28,19	-12,37
	P2	43,39	49,90	65,11	18,40	5,37	-9,84
	P3	49,13	38,48	61,12	57,12	5,19	-2,80

* Diferença percentual = (volume medido pelo LMS – volume manualmente/ volume manualmente) * 100. ** V_P = Volume prolato; V_w = Volume Whitney; M_A = Método das áreas.

No Quadro 5, é possível observar que, para velocidades menores que 3 km h⁻¹, há uma tendência, pelo método da envoltória convexa, a superestimar o volume do dossel de plantas arbóreas.

A maior diferença entre o método de mensuração da envoltória convexa e o M_A foi de 65%. O método da envoltória convexa foi o que melhor representou o volume do dossel, por realizar uma varredura completa do dossel.

O método da envoltória convexa tem como base a criação de um poliedro 3D por meio da junção de vários triângulos ao redor da nuvem de pontos. Após esse procedimento, é realizado o somatório das áreas para obtenção do volume. Para o “envelopamento” de uma nuvem de pontos mais densa, é necessário maior número de faces triangulares.

Quando se utilizou velocidades de trabalho acima de 3 km h⁻¹ a densidade da nuvem de pontos foi menor, desta maneira foi necessário um menor número de faces triangulares, enfatizando-se a tendência a quantificar volumes menores (FIGURA 22). Método da envoltória convexa aplicado sobre duas nuvens de pontos de acordo com a velocidade de deslocamento. Velocidade de deslocamento de 0,5 (A) e 6

km h⁻¹ (C). Método da envoltória convexa aplicada a nuvem de pontos obtida nas velocidades de 0,5 (B) e 6 km h⁻¹ (D).

A aplicação pura e simples do método da envoltória convexa sobre a nuvem de pontos gera certa inconsistência nos dados. Portanto é necessário, assim, de maiores testes para torná-la mais eficiente e consistente.

6.5. Caracterização do dossel de plantas arbóreas, com o LMS

6.5.1 Representação do dossel de plantas arbóreas pelo método de nuvem de pontos, utilizando o LMS

Segundo o fabricante o LMS, como descreve, é capaz de, por meio do conjunto da interação diodo-emissor, espelho rotativo e fotodiodo receptor, realizar uma varredura de 270 ° em torno de si. Como descrito anteriormente, este trabalho foi conduzido em ambiente fechado. Portanto, a nuvem de pontos, composta pelos dados originais, representava todo o ambiente, composto por parede, teto e piso e das plantas (FIGURA 23).



FIGURA 23. Plantas utilizadas para realização do procedimento de mensuração.

É possível observar na Figura 24, esses elementos: preto, representa parede e teto; verde, plantas e vasos; vermelho, solo.

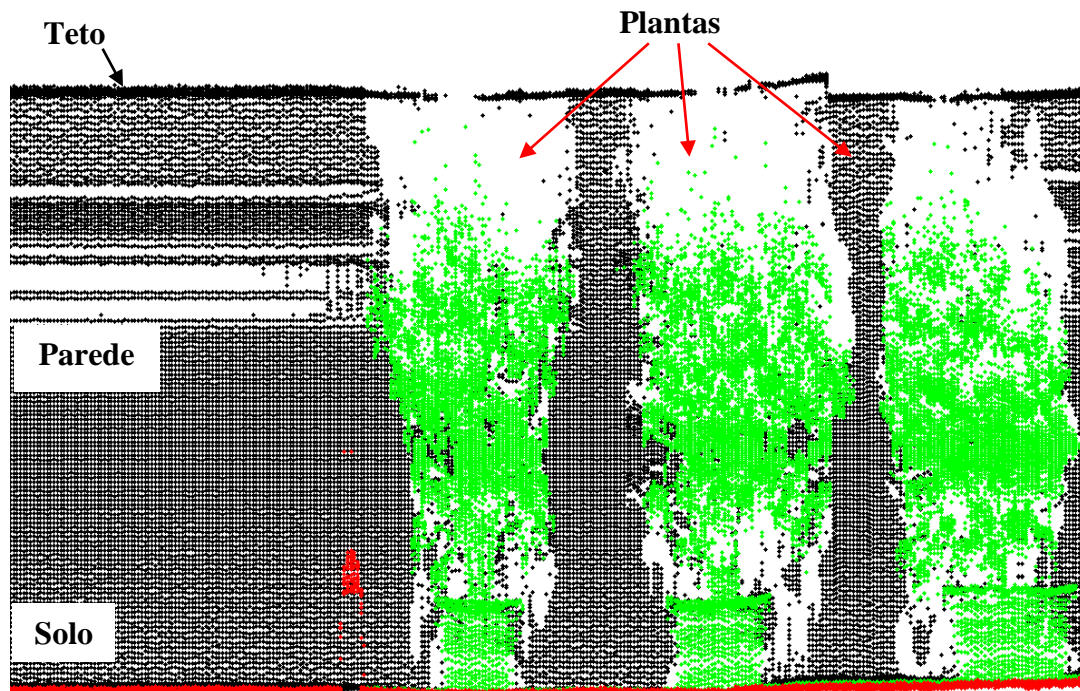


FIGURA 24. Nuvem de pontos original, apresentando as três plantas objeto de estudos.

É possível observar que a utilização do LMS, em interação com o programa computacional MatLab, e na posição vertical, foi eficiente em descrever o ambiente real virtualmente através da nuvem de pontos, aumentando, assim, sua capacidade de uso para outros fins, como na robótica, em que este dispositivo é utilizado como um sistema de visão artificial.

Informações como parede, teto e piso captadas pelo LMS foram consideradas com “ruídos” e não eram de interesse na determinação do volume do dossel.

Houve então a necessidade de realizar o procedimento de filtragem da nuvem de pontos, para que fossem representados os dosséis das três plantas. É possível observar pela Figura 25 que há uma boa correspondência entre os dosséis das três plantas e a nuvem de pontos, obtida com o LMS.

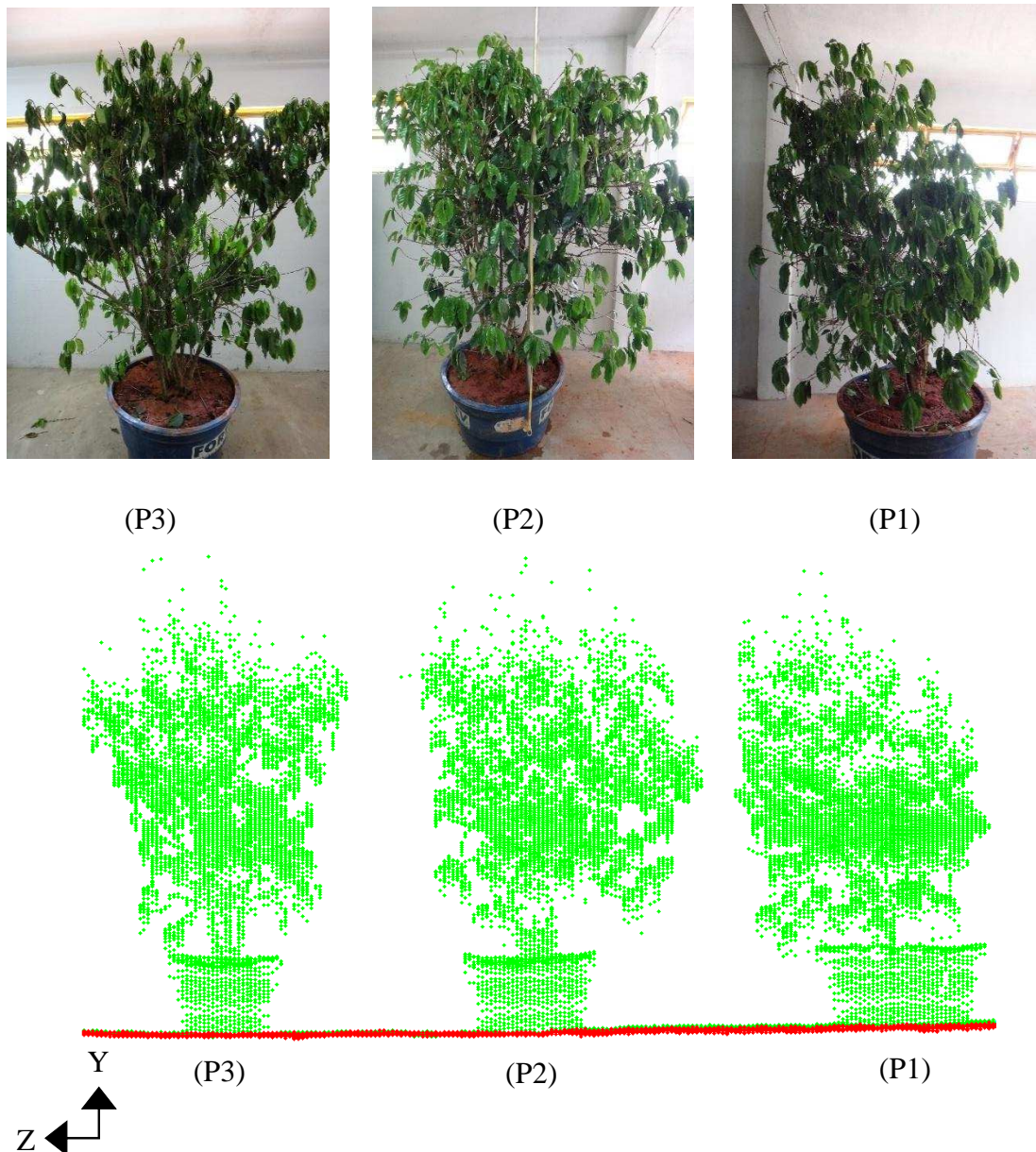


FIGURA 25. Nuvem de pontos representativa dos dosséis das plantas de café. Planta 1 (P1), Planta (2) e Planta 3 (P3), (Vista Frontal).

Na Figura 25 é mostrada a grande semelhança entre as dimensões físicas: forma e aparência global entra as três plantas utilizadas no trabalho e a nuvem de pontos gerada pelo programa MatLab. Esta mesma semelhança foi observada por Rossel et al. (2009), quando realizaram estudos em culturas de pera, maçã, uva e citros.

A nuvem de pontos apresentada foi gerada com a resolução angular de $0,50^\circ$. Para uma fatia individual, esta configuração permitiu sua confecção com um número de 541 valores (pontos). Caso a configuração fosse mudada para uma resolução de $0,25^\circ$, seria possível formar uma nuvem mais densa e, conseqüentemente, mais fiel à realidade; no entanto, o número de dados por fatias dobraria.

A velocidade de deslocamento do LMS reduz a redução, como pode ser observado na Figura 26, a identificação do dossel da cultura, a olhos menos treinados numa primeira observação, além de, segundo Lee e Ehsani (2009), afetar a acurácia da determinação da largura do dossel de plantas arbóreas.

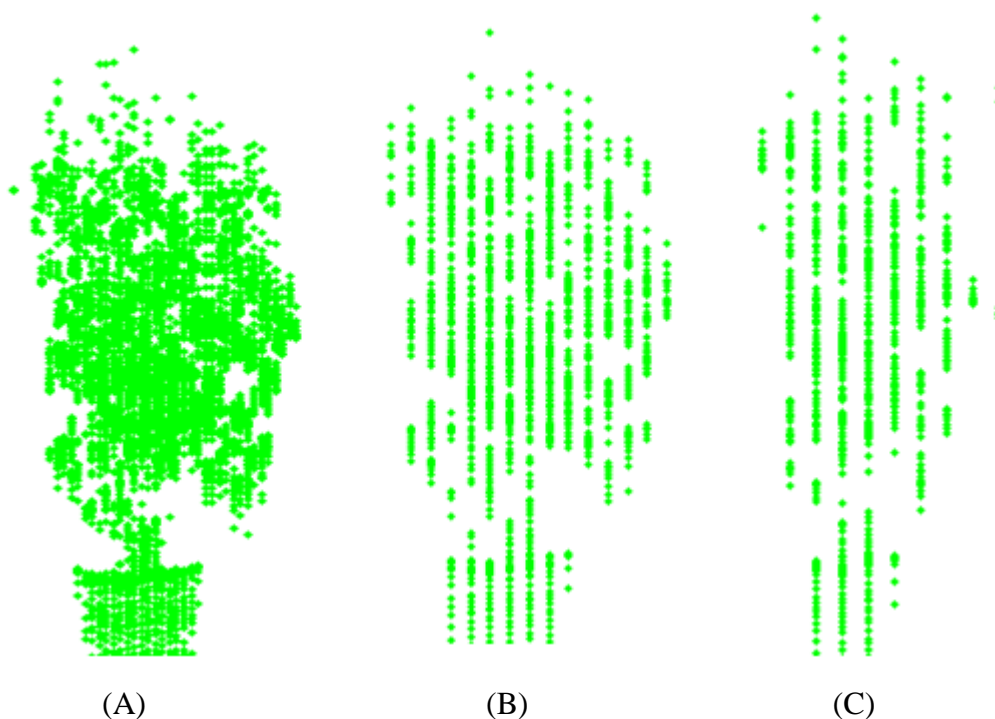


FIGURA 26. Influência da velocidade de deslocamento na representação do dossel de uma mesma planta arbórea, na forma de nuvem de pontos da mesma planta e nas velocidades de 1 (A), 3 (B) e 6 km h⁻¹ (C), (Vista Frontal).

Segundo Zamahn e Salyani (2004), a coleta de informações acerca das características do dossel das plantas por meio da metodologia do sensoriamento remoto, incluindo a metodologia LIDAR. Essa tecnologia pode melhorar a interpretação de características como o crescimento das plantas, tornando uma ferramenta útil para melhorar seu planejamento e gerenciamento, de forma individual, além de reduzir os custos (ROSELL-POLO et al. 2009).

6.5.2. Correlação entre número de impactos e área foliar do dossel de plantas arbóreas

Na Figura 27 é apresentado, na forma de nuvem de pontos, o procedimento de balizamento utilizado. O método mostrou-se apto para a extração de dados a respeito das características do dossel da segunda planta.

Também é possível observar, na Figura 27, o que Sanz-Cortiella et al. (2011b) denominaram de efeito de borda. Esse efeito dá-se em função do comportamento do feixe laser, que é dependente de fatores como distância do objeto mensurado em relação ao LMS, localizado no primeiro plano, da distância do LMS ao alvo presente em um segundo plano, além da percentagem de feixe laser bloqueada pelo alvo localizado no primeiro plano.

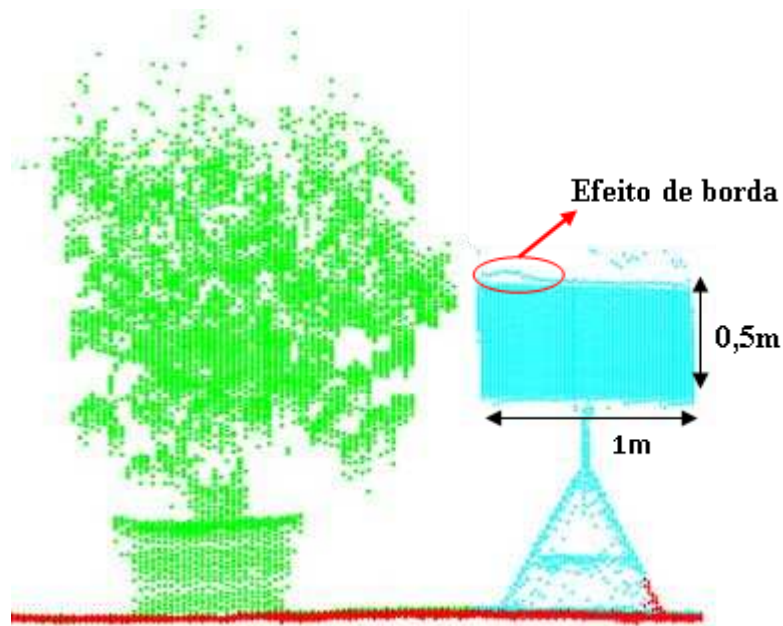


FIGURA 27. Representação em nuvem de pontos do procedimento de balizamento (Vista Frontal).

Extraída a parte da nuvem de pontos correspondente ao vaso, as análises a seguir correspondem apenas ao dossel da planta 2. (FIGURA 28).

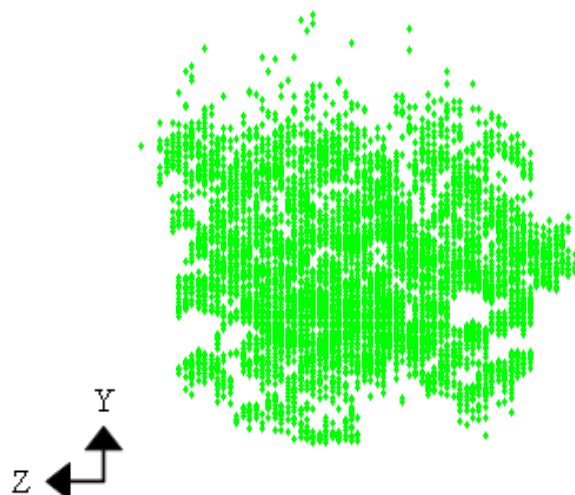


FIGURA 28. Vista frontal da representação em nuvem de pontos do dossel da planta 2 (Vista Frontal).

A divisão do dossel, nuvem de pontos, está representada pela Figura 29. Nota-se que a metodologia proposta tornou possível a identificação dos três terços do dossel, representados pelas cores verde, amarelo e ciano, respectivamente, terços inferior, médio e superior.

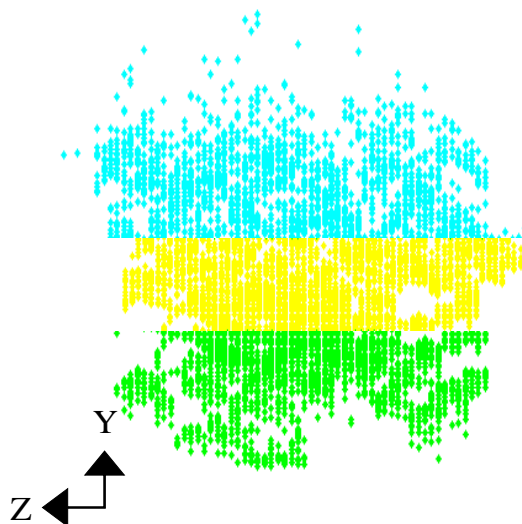


FIGURA 29. Vista frontal da divisão da nuvem de pontos representativa do dossel da planta nos terços inferior, médio e superior (Vista Frontal).

Além da divisão do dossel em três terços, o método permitiu também a divisão de cada uma das partes em duas outras, identificadas como interna e externa. Elas podem

ser observadas na Figura 30 e identificadas pelas cores verde (terços inferior e superior), amarelo (terço médio externo) e ciano (terço médio interno).

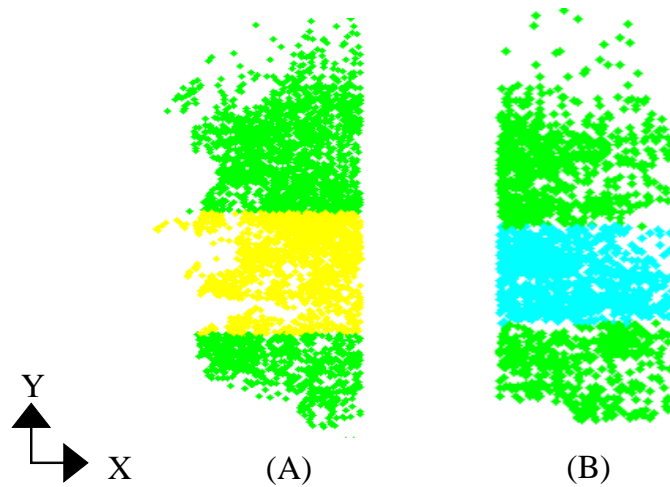


FIGURA 30. Vista lateral direita da representação em nuvem de pontos das divisões do dossel de cada um dos terços, nas partes externa (A) e interna (B), (Vista Lateral Direita).

Analisando-se o Quadro 6, é possível observar que a área foliar da planta (P2) aumenta ao do terço inferior para o superior de 0,296 a 0,565 cm². Com relação ao número de impactos, a mesma tendência é observada, independentemente da velocidade de deslocamento. Com o aumento da velocidade, há diminuição do número de impactos, observada previamente na Figura 24, mantendo-se, no entanto, a mesma tendência.

QUADRO 6. Densidade da nuvem de pontos (pontos cm⁻²) na parte externa do dossel de uma planta de café (P2) nos três terços em função da velocidade de deslocamento

Terços	Área foliar (cm ²)	Densidade da nuvem de pontos					
		Velocidade (km h ⁻¹)					
		0,5	1	2	3	5	6
Inferior	0,296	2014	1209	446	2851	84	172
Médio	0,417	3631	2458	918	2055	290	420
Superior	0,565	5027	3662	1593	1713	814	358
Correlação		0,999	0,998	0,990	0,932	0,968	0,916

Há forte correlação linear entre a área foliar do dossel e o número de impactos apresenta, (DANCEY e REIDY, 2006), independentemente da velocidade de deslocamento, quando analisada a parte externa do dossel. Para as velocidades estudadas, os valores de correlação encontrados foram 0,999; 0,998; 0,990; 0,932; 0,968; 0,916 (FIGURA 31).

De acordo com a lei de Beer, a transmissão de um feixe de luz através de uma planta é atenuada exponencialmente, de acordo com a Equação 13.

$$\frac{I_1}{I_0} = I_0 e^{-\alpha r} \quad (13)$$

em que:

I_1 = intensidade da luz após atravessar o meio;

I_0 = intensidade da luz incidente;

α = absorvidade molar da substância; e,

r = concentração de substância absorvente no meio.

No caso em questão, o fator α está relacionado com a densidade de área e orientação da folha. Levando-se em consideração estes fatores, foi realizado também o estudo da correlação entre o número de impactos e a área foliar do dossel, na parte interna do dossel.

À medida que a velocidade de deslocamento é aumentou, o número de impactos nos três terços do dossel interno diminuiu. Para atingir a parte interna do dossel, os feixes de laser têm um barreira externa a ser vencida para que o LMS realize as mensurações

das distâncias. Como parte da energia incidida sobre o dossel é retido por essa barreira, a densidade da nuvem de pontos, de acordo com a Quadro 7, em todas as velocidades, é menor, quando comparado com o mostrado no Quadro 6.

QUADRO 7. Densidade da nuvem de pontos (pontos cm^{-2}) na parte interna do dossel de uma planta de café (P2) nos três terços em função da velocidade de deslocamento

Terços	Área foliar (cm^2)	Densidade da nuvem de pontos					
		Velocidade (km h^{-1})					
		0,5	1	2	3	5	6
Inferior	0,200	2640	1550	990	495	595	730
Médio	0,852	1258	739	264	115	150	183
Superior	2,073	881	540	451	143	233	153
Correlação		0,997	0,998	0,950	0,938	0,950	0,956

Também é possível observar a correlação entre o número de impactos e área foliar do dossel, indicando que o LMS é capaz de caracterizar, também, o dossel de plantas arbóreas em distâncias próximas ao eixo central. Os valores de correlação entre o número de impactos e a área foliar, nas velocidades de 0,5; 1; 2; 3; 5 e 6 km h^{-1} , foram respectivamente: 0,997; 0,998; 0,950; 0,938; 0,950; 0,956 (FIGURA 32).

A redução da densidade da nuvem de pontos com o aumento da velocidade de deslocamento também foi observada por Sanz-Cortiella et al. (2011a), em estudo realizado com planta ornamental (*Ficus*), nas velocidades de 0,5; 1 e 1,5 km h^{-1} , utilizando a resolução de 0,50°. Esses autores também mencionam a redução do número de impactos na parte interna do dossel, mais próxima ao eixo central da planta, por causa da barreira formada por folhas e galhos presentes na parte exterior.

6.5.3. Estimativa da altura e largura de plantas arbóreas pelo LMS

A utilização do LMS para determinação de características estruturais, como altura e largura de plantas arbóreas, mostrou ser uma ferramenta de utilização satisfatória.

Como se observa pelo Quadro 8, a variação da velocidade de deslocamento não alterou a capacidade do LMS em determinar a real altura das três plantas (At -As), que, medidas manualmente foram, respectivamente, de 1,75; 1,79 e 1,75 m para as plantas 1, 2 e 3.

QUADRO 8. Altura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento

Planta	Velocidade (km h ⁻¹)					
	0,5	1	2	3	5	6
P1	1,42	1,30	1,26	1,35	1,19	1,20
P2	1,49	1,45	1,48	1,42	1,39	1,33
P3	1,47	1,50	1,40	1,28	1,28	1,20
MÉDIA	1,46	1,42	1,38	1,35	1,29	1,24

Em trabalho de Lee e Ehsani (2009), utilizando o LMS com a finalidade de mensurar a altura de plantas de laranja, foram obtidos valores próximos, porém 0,41 % menores do que os obtidos com medição manual, trabalhando a uma velocidade de 3,6 km h⁻¹.

Considerando-se, para esta etapa, a velocidade de 3 km h⁻¹, as alturas mensuradas pelo dispositivo LMS 111 para as plantas 1, 2 e 3 foram, respectivamente, de - 22,86; - 20,67% e - 26,86 %, menores que as obtidas por medidas realizadas manualmente determinadas através da relação: Diferença percentual = (altura mensurada pelo LMS – altura medida manualmente/ altura medida manualmente) * 100. Os resultados negativos indicaram que os valores mensurados pelo LMS 111 foram menores, segundo metodologia de Lee e Ehsani (2009).

Em cultura da uva, utilizando, também, o LMS, Llorens et al. (2011) obtiveram valores de altura menores que os obtidos quando da medição manual, em uma velocidade de 4,5 km h⁻¹.

É possível observar que através do Quadro 9 que a velocidade não foi um fator influenciador da capacidade do LMS em determinar a altura das plantas e que independente da velocidade utilizada o LMS mensurou as mesmas alturas.

QUADRO 9. Altura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento em comparação com o método manual

Método Manual	Velocidade (km h ⁻¹)					
	0,5	1	2	3	5	6
1,76a	1,46b	1,42b	1,38b	1,35b	1,29b	1,24b

(*) Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

No Quadro 10, são apresentados os valores de largura das três plantas analisadas. A menor largura mensurada pelo LMS foi a da planta 1, na velocidade de 5 km h⁻¹ (0,89 m), valor 0,26 % menor que a largura medida manualmente (1,20m), segundo metodologia descrita por Lee e Ehsani (2009).

Os outros valores mensurados não apresentaram diferença estatística. O procedimento de mensuração utilizando o LMS foi apto a reproduzir as características das três plantas, plantas 1 e 3 com valores de largura menores (1,20m) e a planta 2 com largura de 1,47 m com largura média de 1,29 m.

QUADRO 10. Largura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento

Planta	Velocidade (km h ⁻¹)					
	0,5	1	2	3	5	6
P1	1,06	1,16	1,02	1,12	1,14	1,10
P2	1,10	1,28	1,23	1,19	1,07	1,17
P3	0,82	0,92	1,05	1,19	0,84	1,03
MÉDIA	0,99	1,12	1,10	1,16	1,02	1,10

Considerando-se, também, para este parâmetro a velocidade de deslocamento de 3 km h⁻¹, a largura mensurada pelo LMS para a planta 2 e 3 foi -7,75 % menor que a largura medida manualmente. Para a planta 1, o valor mensurado foi -13,18 %, também menor que a medida manualmente.

Não houve diferença, para determinação do parâmetro largura, na utilização do método manual ou do sistema LMS, demonstrando que o mesmo pode ser uma ferramenta útil no campo para determinação deste parâmetro (QUADRO 11)

QUADRO 11. Largura (m) mensurada pelo LMS em função da velocidade de deslocamento em comparação com o método manual

Método Manual	Velocidade (km h ⁻¹)					
	0,5	1	2	3	5	6
1,29a	0,99a	1,12a	1,10a	1,16a	1,02a	1,10a

(*) Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha pertencem a um mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

A largura das plantas mensuradas pelo LMS sofre a influência da velocidade. Segundo Lee e Ehsani (2009), a largura mensurada de uma planta é tanto mais acurada quanto mais estável for a velocidade de deslocamento. Para o estuo conduzido este fato não foi observado.

A precisão na mensuração da largura com o LMS, segundo os autores, pode ter sua capacidade aumentada, diminuindo-se a resolução de trabalho, ou seja, 0,25° entre mensurações. No entanto, esta configuração influencia na mensuração da altura.

7. CONCLUSÕES

- Foi possível a utilização do programa computacional MatLab como mediador do envio de mensagens, a fim de configurar e utilizar o LMS.
- A metodologia utilizada para mensuração do volume do dossel de plantas arbóreas com o LMS foi capaz de determinar o volume do dossel de plantas arbóreas em tempo real.
- A mensuração do volume do dossel de plantas arbóreas com o sensor LMS é uma ferramenta importante para a economia do volume de calda de pulverização.
- A determinação do volume do dossel de plantas arbóreas pelo método da envoltória convexa é indicada quando a velocidade de deslocamento for superior a 3 km h⁻¹.
- O LMS mostrou ser uma ferramenta capaz de coletar dados a respeito das características altura e largura de plantas arbóreas, tornando o procedimento menos árduo e reduzindo a necessidade de o trabalho ser realizado manualmente.

8. REFERÊNCIAS

ABIFINA. Defensivos Agrícolas - notícias. In: Associação Brasileira das Indústrias de Química Fina, Biotecnologia e suas Especialidades. [acessado Out 13]. Disponível em: <http://www.abifina.org.br/noticiaSecao.asp?secao=1¬icia=1918>.

ANDERSEN, H., RENG, L., KIRK, K., Geometric plant properties by relaxed stereo vision using simulated annealing. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 49, p 219–232. 2005.

ASCHOFF, T., THIES, M., SPIECKER, H. Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. In: Conference Proceedings ISPRS Conference. ISPRS International

Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences vol. XXXV, Part B, Istanbul, Turkey, 12–23 July 2004, pp. 237–241. 2004.

BÓCOLI, M. A. Quantificação de depósitos do pulverizador tipo canhão em lavoura cafeeira (*coffea arabica* l.) com espaçamento convencional. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Superior de Tecnologia em Cafeicultura. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Sul de Minas Gerais, Campus Muzambinho. Muzambinho-MG. 2009.

BONGERS, F. Methods to assess tropical rain forest canopy structure: an overview. **Plant Ecology**. v. 153, p. 263–277. 2001.

BUYERS, R.E.; HICKEY, K.D.; HILL, C.H. Base gallonage per acre. **Virginia Fruit**. v. 60, p. 19-23. 1971.

CARAMÉS, C. F. Técnicas de Navegación de Robots Basadas en Sistemas de Medición por Láser. (**Monografía**). Departamento de Informática y Automática Universidad de Salamanca. p. 120. 2007.

CHEN, Y., ZHU, H., OZKAN, E. 2011. Development of LIDAR-guided sprayer to synchronize spray outputs with canopy structures. ASABE Annual International Meeting. Paper No. Disponível em: <http://asae.frymulti.com/azdez.asp>. Acessado em 28 de novembro de 2013.

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre, Artmed. 2006.

ESCOLÀ, A.; ROSELL-POLO, J. R.; PLANAS, S.; GIL, E.; POMAR, J.; CAMP, F.; LLORENS, J.; SOLANELLES, F. Variable rate sprayer. Part 1 – Orchard prototype: Design, implementation and validation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 95, n. 0, p. 122-135, 2013.

FERREIRA, M. C.; COSTA, G. M.; SILVA, A. R.; TAGLIARI, S. R. A. Fatores qualitativos da ponta de energia hidráulica ADGA 110015 para pulverização agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.471-478. 2007.

FLOYD, T. L. **Sistemas Digitais: Fundamentos e Aplicações** / Thomas L. Floyd; tradução José Lucimar do Nascimento. – Dados eletrônicos. – 9. ed. – Porto Alegre : Bookman, 2007.

GARCÍA, M.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; DANSOND, F. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**. n.114, p. 816–830. 2010.

GHILANI, C. D; WOLF P. R., (2012), **Elementary surveying: an introduction to geomatics**. Pearson Education.

GIL, E.; LLORENS, J.; LLOP, J.; FÀBREGAS, X.; ESCOLÀ, A.; ROSELL-POLO, J. R. Variable rate sprayer. Part 2 – Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 95, n. 0, p. 136-150, 2013.

GIULIANI, R., MAGNANINI, E., FRAGASSA, C., NEROZZI, F. Ground monitoring the light shadow windows of a tree canopy to yield canopy light interception and morphological traits. **Plant Cell Environment**. V. 23, p. 783–796. 2000.

HAHN, B. D.; VALENTINE, D. T. **Essential Matlab for Engineers and Scientists (Fourth Edition)**. Boston: Academic Press, 2010.

JEON, H. Y.; ZHU, H.; DERKSEN, R.; OZKAN, E.; KRAUSE, C. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray application. **Computers and Electronics in agriculture**. v. 75, n 1, p. 213-221. 2011.

KISE, M., ZHANG, Q. Reconstruction of a virtual 3D field scene from ground-based multi-spectral stereo imaging. In: Proceedings of the 2006 ASABE Annual International Meeting, Portland, Oregon. Paper Number 063098. 2006.

KOCH, B. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. p. 581–590. 2010.

LE MAIRE, G., FRANC, OIS, C., SOUDANI, K., BERVEILLER, D., PONTAILLER, J., BRÉDA, N., GENET, H., DAVI, H., DUFRÊNE, E. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. **Remote Sensing of Environment**. v.112, p. 3846–3864. 2008.

LEBLANC, S.G., CHEN, J.M., FERNANDES, R., DEERING, D.W., CONLEY, A. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forest. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 129, p. 187–207. 2005.

LEE, K.; R. EHSANI. A laser-scanning system for quantification of tree-geometric characteristics. **Applied Engineering in Agriculture**. n. 25, vol 5, p. 777-788. 2009.

LLORENS, J.; GIL, E.; LLOP, J.; ESCOLÀ, A. Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods. **Sensors**, v. 11, n. 2, p. 2177-2194, 2011.

MAGNO JÚNIOR, R. G.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, L. B.; FERREIRA, L. R.; ALVARENGA, C. B. Desenvolvimento de um sistema eletrônico para atração de gotas da aplicação eletrostática em plantas cítricas. **Bioscience Journal**. v. 27, n. 5, p. 798-804. 2011.

MANKTELOW, D.W.L.; PRAAT, J-P. The tree-row-volume spraying system and its potential use in New Zealand. Proc. 50th N.Z. **Plant Protection Conf**. p.119-124. 1997.

MOLTÓ, E.; MARTÍN, B.; GUTIÉRREZ, A. PM—Power and Machinery: Design and Testing of an Automatic Machine for Spraying at a Constant Distance from the Tree Canopy. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 77, n. 4, p. 379-384, 2000.

MORGAN, N.G., Gallons per acre of sprayed area: an alternative standard term for spraying plantations. **World Crops**. p. 64-65. 1964.

PALACIN, J.; SALSE, J.A.; SANZ-CORTIELLA, R.; RIBES-DASI, M.; MASIP, J.; ARNÓ, J.; LLORENS, J.; VALLÉS, J.M.; ESCOLÀ, A.; MASSANA, P.; CAMP, F.; SOLANELLES, F.; ROSELL, J.R. Real-Time Tree Foliage Estimation Using a Ground Laser Scanner. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v. 56, n. 4, p. 1377-1383 2007.

PHATTARALERPHONG, J., SINOQUET, H. A method for 3D reconstruction of tree canopy volume from photographs: assessment from 3D digitised plants. **Tree Physiology**. v.25, p. 1229–1242. 2005.

RAETANO, C. G; MATUO, T. Efeito da pulverização com turboatomizadores em diferentes condições operacionais no controle de ácaros em citros. **Anais da Sociedade de Entomologia do Brasil**. v.28, n.1, p. 131.140. 1999.

ROSELL, J.R., LLORENS, J., SANZ-CORTIELLA, R., ARNÓ, J., RIBES-DASI, M., MASIP, J., ESCOLÀ, A., CAMP, F., SOLANELLES, F., GRÀCIA, F., GIL, E., VAL, L., PLANAS, S., PALACÍN, J. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.149, p. 1505–1515. 2009.

ROSELL-POLO, J.R.R.; SANZ-CORTIELLA, R.; LLORENS, J.; ARNO, J.; ESCOLA, A.; RIBES-DASI, P.; MASIP, J.; CAMP, F.; GRACIA, F.; SOLANELLES, F.; PALLEJA, T.; PAL, L.; PLANAS, S.; GIL, E.; PALACIN, J. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. **Biosystems Engineering**. v. 102. p. 128-134. 2009.

ROVIRA-MÁS, F., ZHANG, Q., REID, J. Creation of Three-dimensional Crop Maps based on aerial stereoisimages. **Biosystems Engineering**. v. 90, n. 3, p. 251–259. 2005.

SANZ-CORTIELLA, R.; LLORENS-CALVERAS, J.; ESCOLÀ, A.; ARNÓ-SATORRA, J.; RIBES-DASI, M.; MASIP-VILALTA, J.; CAMP, F.; GRÀCIA-AGUILÁ, F.; SOLANELLES-BATLLE, F.; PLANAS-DEMARTÍ, S.; PALLEJÀ-CABRÉ, T.; PALACIN-ROCA, J.; GREGORIO-LOPEZ, E.; DEL-MORAL-MARTÍNEZ, I.; ROSELL-POLO, J. R. Innovative LIDAR 3D Dynamic Measurement System to Estimate Fruit-Tree Leaf Area. **Sensors**, v. 11, n. 6, p. 5769-5791, 2011a.

SANZ-CORTIELLA, R.; LLORENS-CALVERAS, J.; ROSELL-POLO, J.R.; GREGORIO-LOPEZ, E.; PALACIN-ROCA, J. Characterization of the LMS200 Laser Beam under the Influence of Blockage Surfaces. Influence on 3D Scanning of Tree Orchards. **Sensors**. n.11, p. 2751-2772. 2011b.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics*, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512, 1974.

SICK AG. LMS 1xx/LMS 111/Outdoor/ Short Range. Laser Measurements Systems, Technical Description. 2009.

SOLANELLES, F., ESCOLÀ, A., PLANAS, S., ROSELL, J.R., CAMP, F., GRACIA, F. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. ***Biosystems Engineering***. v. 95, n. 4, p. 473–481. 2006.

SUN, G.; RANSON, K. J.; GUO, Z.; ZHANG, Z.; MONTESANO, P.; KIMES, D. Forest biomass mapping from lidar and radar synergies. ***Remote Sensing of Environment***. v. 115, p. 2906–2916. 2011.

TUMBO, S. D.; SALYANI M.; WHITNEY, J. D.; WHEATON T. A.; W. MILLER, M. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. ***Applied Engineering in Agriculture***. v. 18. p. 367-372. 2002.

TUMBO, S. D.; SALYANI, M.; WHITNEY, J. D.; WHEATON, T. A.; MILLER, W. M. Investigation of Laser and Ultrasonic Ranging Sensors for Measurements of Citrus Canopy Volume. ***Transactions of the ASAE***. v. 18, n.3, p. 367-372. 2002.

TUOMINEN, S.; PEKKARINEN, A. Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multisource forest inventory. ***Remote Sensing of Environment***, n. 94, p. 256–268. 2005.

VAN DER ZANDE, D.; HOET, W.; JONCKHEERE, I.; VAN AARDT, J.; COPPIN, P. Influence of measurement set-up of ground-based LIDAR for derivation of tree structure. ***Agricultural and Forest Meteorology***. v. 141, n. 2–4, p.147–160. 2006.

WEI, J.; M. SALYANI. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement. *Transactions of the ASAE*. v. 48. p. 1595-1601. 2005.

WHEATON, T. A.; WHITNEY, J. D.; CASTLE, W. S.; MURARO, R. P.; BROWNING, H. W.; TUCKER, D. P. H. Citrus Scion and Rootstock, Topping Height, and Tree Spacing Affect Tree Size, Yield, Fruit Quality, and Economic Return. ***Journal of the American Society for Horticultural Science***. n. 120, v. 5, p. 861-870. 1995.

ZAMAN, Q.U., SCHUMANN, A.W., MILLER, W.M. Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sense tree size. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 21, n 3, p. 331–335. 2005.

ZAMAN, Q.U.; SALYANI, M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 20, n.2, p. 173–178. 2004.

ZHANG, L.; GRIFT, T. E. A LIDAR-based crop height measurement system for *Miscanthus giganteus*. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 85, p. 70-76. 2012.

ZHAO, K.; POPESCU, S.; MENG, X.; PANG, Y.; AGCA, M. Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning. n.115, p. 1978–1996. 2011.

ZHU, H.; DERKSEN, R.C.; GULER, H. C.; KRAUSE, R.; OZKAN H.E. Foliar deposition and off-target loss with different spray techniques in nursery applications. **Transactions of the ASABE**. v. 49, n.2, p. 325-334. 2006.