

LUCAS DE ARRUDA VIANA

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO MULTIESPECTRAL PARA A
DETERMINAÇÃO DE REFLECTÂNCIA NA AGRICULTURA**

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*.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto

Coorientadores: Domingos Sárvio M. Valente
Daniel Marçal de Queiroz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V614d
2021 Viana, Lucas de Arruda, 1989-
Desenvolvimento de equipamento multiespectral para a
determinação de reflectância na agricultura / Lucas de Arruda Viana. -
Viçosa, MG, 2021.
82 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Vegetação - Mapeamento. 3.
Agricultura - Processamento de dados. 4. Reflectância. 5. Detectores
ópticos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

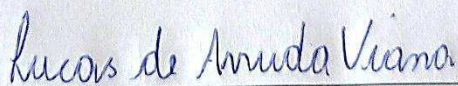
LUCAS DE ARRUDA VIANA

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO MULTIESPECTRAL PARA A
DETERMINAÇÃO DE REFLECTÂNCIA NA AGRICULTURA

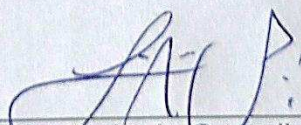
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 18 de janeiro de 2021.

Assentimento:



Lucas de Arruda Viana
Autor



Francisco de Assis de Carvalho Pinto
Orientador

Dedico esta tese aos meus pais, José Luiz e Maria José; aos meus irmãos, Luizmar, Mariluci, Lucimar e Luana (em memória), e à minha namorada, Deborah, pelo carinho, pela paciência, pela dedicação e pelo amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela família que tenho e por toda a oportunidade e iluminação que me dá em minha vida.

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

À CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo em momentos distintos.

Ao professor orientador Francisco de Assis de Carvalho Pinto pela oportunidade e orientação.

Aos professores coorientadores Daniel Marçal de Queiroz e Domingos Sárvio Magalhães Valente pela contribuição no desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas da Universidade Federal de Viçosa pela cooperação nas disciplinas e na pesquisa.

Aos familiares, aos amigos e ao grupo de pesquisa pelo apoio e incentivo durante o período de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

BIOGRAFIA

Lucas de Arruda Viana nasceu na cidade de Itabira-MG, filho de Maria José de Arruda Viana e José Luiz Viana.

Realizou o Ensino Fundamental e Médio na Escola Estadual Professora Marciana Magalhães, no município de Itabira/MG, e ingressou no curso de graduação de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV) no ano de 2009.

No intervalo de agosto de 2012 a agosto de 2013 fez intercâmbio na *Universidad de Santiago de Compostela*, na cidade de Lugo - Espanha, retornando posteriormente para a UFV.

Colou grau em janeiro de 2015, recebendo menção honrosa da Medalha Artur Bernardes como melhor graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Em março de 2015 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de mestrado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola, no setor de Energia na agricultura, obtendo título de *Magister Scientiae* em 20 de fevereiro de 2017.

Em março de 2017 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de doutorado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola, no setor de Mecanização Agrícola, submetendo-se à defesa da tese em 18 de janeiro de 2021, com a obtenção de título de *Doctor Scientiae* no mesmo dia.

RESUMO

VIANA, Lucas de Arruda, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2021. **Desenvolvimento de equipamento multiespectral para a determinação de reflectância na agricultura.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Daniel Marçal de Queiroz e Domingos Sárvio Magalhães Valente.

O crescimento da população mundial, somado às crises econômicas e ambientais, tem acentuado as disparidades sociais e, como consequência, o aumento da pobreza e fome. Aumentar a produção agrícola de forma sustentável com foco em mitigar o problema da fome mundial é o caminho a ser trilhado pela sociedade. Visando aumentar a produtividade com menor uso de recursos, bem como menores danos ambientais, o uso de tecnologias ligadas à agricultura digital tem mostrado ser indispensável. Diferentes estudos científicos apresentam resultados que demonstram que o manejo agrícola, com o auxílio de sensores espectrais portáteis, pode contribuir para o aumento da produção e otimização do uso de insumos, em especial os fertilizantes nitrogenados. Os resultados desses estudos ainda ressaltam que o barateamento das tecnologias deva acontecer para uma maior popularização do uso de sensores espectrais na agricultura. Reduzir o custo de uma tecnologia favorece a popularização, em especial nos países em desenvolvimento, onde a atividade agrícola é o pilar de sustentação econômica. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sensor ativo portátil multiespectral, de baixo custo, capaz de medir de forma precisa e confiável a reflectância em dez bandas do espectro eletromagnético. O sensor foi constituído por um circuito eletrônico que une um computador de placa única a um regulador de tensão, a um sistema de iluminação por LEDs de alta potência, a um dispositivo óptico e a uma tela LCD. O processo de medição da reflectância consiste em direcionar uma fonte de luz sobre o alvo a ser analisado, e o sensor converte a parte da radiação refletida que é captada em pulso elétrico, e este pulso é processado e convertido em valores de reflectância. Experimentos de laboratório e de campo foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do sensor na coleta de dados, bem como sua estabilidade. Para avaliar o desempenho, em ambiente de laboratório, foram comparadas as medidas de reflectâncias do sensor com as medidas feitas pelo espectrorradiômetro, para alvos sintéticos e naturais. A estabilidade foi verificada por meio de um experimento

montado por 12 semanas e nesse experimento foi verificado se houve alterações das medições de reflectância. Para verificar se as medidas de reflectância do sensor são modificadas pela variação da iluminação no ambiente de medida, foram comparadas as medições de reflectância feitas com ausência de qualquer iluminação com as medições feitas em ambiente iluminado. O menor coeficiente de correlação de Pearson entre os dados medidos pelo sensor desenvolvido e pelo espectrorradiômetro foi de $r = 0,9731$ e o maior $0,9977$. O RMSE médio para medida de reflectâncias em folhas de plantas e em solos foi de $0,03$. Os resultados mostram precisão e exatidão das leituras de reflectância nos dez comprimentos de onda medidos pelo sensor desenvolvido. No experimento de campo foram comparadas as medições de NDVI feitas pelo sensor desenvolvido com as medições de NDVI feitas pelos sensores GreenSeeker e câmera MicaSense-MX. As medidas de NDVI feitas pelo sensor desenvolvido comparadas com as obtidas pelo GreenSeeker obtiveram $R^2 = 0,8011$ e com a MicaSense-MX, $R^2 = 0,7039$. Os resultados em campo mostraram que o sensor desenvolvido é capaz de medir NDVI de forma semelhante em relação às medidas de NDVI feitas pelos sensores GreenSeeker e pela câmera MicaSense-MX. Os resultados comprovaram a estabilidade e a capacidade de medir, de forma confiável, as reflectâncias em dez bandas espectrais e monitorar de forma indireta a saúde das plantas por meio do índice de vegetação NDVI. O sensor multiespectral desenvolvido mostrou ter potencial para ser usado na agricultura, podendo contribuir para uma produção mais sustentável e com otimização de uso de insumos agrícolas.

Palavras-chave: Sensor espectral. Sensor óptico. Sensor ativo. Agricultura digital. Agricultura de precisão. Índice de vegetação. Reflectância.

ABSTRACT

VIANA, Lucas de Arruda, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2021. **Development of a multispectral equipment for the determination of reflectance in agriculture.** Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisers: Daniel Marçal de Queiroz and Domingos Sárvio Magalhães Valente.

Overpopulation and its exponential growth, and to the economic and environmental crises have accentuated social disparities and, consequently, the increase in poverty and hunger. The necessary increase in agricultural production should be achieved to mitigate world hunger. To increase crop yield with less use of resources and minor environmental damage, the use of technologies related to digital agriculture has proven to be indispensable. Different scientific studies have shown that agricultural management, with the aid of portable spectral sensors, can contribute to increased production and optimization of the use of inputs, especially nitrogen fertilizers. The results of these studies still emphasize that low-cost technologies must be available for the widespread use of spectral sensors in agriculture. In this context, the main objective of this work was to develop a low-cost portable multispectral active sensor, capable of accurately and reliably measuring the reflectance in ten bands of the electromagnetic spectrum. This sensor consists of an electronic circuit that links a single-board computer to a voltage regulator, a high-power LED lighting system, an optical device and an LCD screen. The reflectance measurement process consists of directing a light source on the target to be analyzed, and the sensor converts the part of the reflected radiation that is received into an electrical pulse, which is processed and converted into reflectance values. Laboratory and field experiments were carried out to evaluate the performance of the sensor in data collection, as well as its stability. To assess performance, in a laboratory environment, the reflectance measurements of the sensor were compared to the measurements made by the spectroradiometer, for synthetic and natural targets. The stability was verified employing an experiment set up for 12 weeks, in which it was verified if there were any changes in the reflectance measurements. To verify if the reflectance measurements of the sensor could be modified by the variation of the illumination in the measurement environment, the reflectance measurements made in the absence of any illumination were compared to the measurements made in an illuminated environment. The lowest Pearson

correlation coefficient between the data measured by the developed sensor and the spectroradiometer was $r = 0.9731$ and the highest 0.9977 . The average RMSE for measuring reflectance on plant leaves and soil was 0.03 . The results show the precision and accuracy of the reflectance readings at the ten wavelengths measured by the developed sensor. In the field experiment, the NDVI measurements made by the developed sensor were compared to the NDVI measurements made by the GreenSeeker sensors and the MicaSense-MX camera. NDVI measurements made by the developed sensor compared to those obtained by GreenSeeker obtained $R^2 = 0.8011$ and with MicaSense-MX, $R^2 = 0.7039$. The results in the field showed that the developed sensor is capable of measuring NDVI similarly concerning the NDVI measurements made by the GreenSeeker sensors and by the MicaSense-MX camera. The results confirmed the stability and ability to reliably measure reflectances in ten spectral bands and indirectly monitor plant health using the NDVI vegetation index. The developed multispectral sensor has shown the potential to be used in agriculture, being able to contribute to more sustainable production and with optimization of the use of agricultural inputs.

Keywords: Spectral sensor. Optical sensor. Active sensor. Digital agriculture. Precision agriculture. Vegetation index. Reflectance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Sensor óptico ativo portátil multiespectral, ReflecSense: (a) vista do sensor e (b) detalhe do menu de seleção de índices/reflectâncias. (A) capa plástica de proteção de todo o circuito eletrônico que se encontra interno e (B) tronco piramidal de quatro faces em alumínio, com objetivo de reduzir o excesso de iluminação externa. A base da pirâmide é o limiar da posição do sensor e o alvo. (C) detalhe do LCD mostrando o menu de interação com o usuário para a seleção entre medir índices ou medir reflectâncias e (D) exemplo do resultado da medida de NDVI de uma planta.	23
Figura 2.2. Dispositivos SparkFun Triad AS7265X (a) e SparkFun VL53L1X (b).....	24
Figura 2.3. Visão geral dos componentes, das conexões e das comunicações do circuito eletrônico do sensor ReflecSensor.	26
Figura 2.4. Assinatura espectral de 13 padrões de cores obtidas pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM.	28
Figura 2.5. Amostras vegetais e de solos.	29
Figura 2.6. Assinatura espectral de 15 novos padrões de cores medidos pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM.	30
Figura 2.7. Comparação entre as reflectâncias medidas pelo espectrorradiômetro com as do ReflecSense para 13 padrões de cores para os dez comprimentos de ondas medidos pelo sensor ReflecSense.	32
Figura 2.8. Comparação da assinatura espectral gerada com os dados medidos pelo ReflecSense com os medidos pelo espectrorradiômetro para seis alvos naturais.....	35
Figura 2.9. Variação, ao longo de 12 semanas, das medidas de reflectâncias feitas pelo sensor ReflecSense de 15 superfícies homogêneas e uniformes de dois comprimentos de onda.	39
Figura 3.1. Localização geográfica da área experimental de plantio de milho no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil.....	47
Figura 3.2. Fluxograma desde a aquisição de imagens até os cálculos do índice de vegetação.....	50
Figura 3.3. Comparação entre as medidas de NDVI feitas pelo ReflectoSensor com as do GreenSeeker e MicaSense-MX em experimento de campo em área cultivada com milho.	52
Figura 3.4. Comparação entre as medidas de NDVI feitas pelo GreenSeeker com as do sensor MicaSense-MX em experimento de campo em área cultivada com milho.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resultados da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e do desvio padrão na determinação de reflectância pelo ReflectoSense para seis alvos naturais.....	36
Tabela 2.2. Valores médios de reflectâncias, para 15 superfícies de cores, medidas com ausência de iluminação e com iluminação, para cada um dos dez comprimentos de onda medidos pelo ReflecSense.....	38
Tabela 2.3. Resultados do indicador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) na determinação de reflectância pelo ReflectSense ao longo de 12 semanas, para os dez comprimentos de onda, em 15 superfícies	40
Tabela 3.1. Coletas de dados com ReflecSense nos diferentes estágios de crescimento do milho.....	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AP	Agricultura de precisão
ANOVA	Análise de variância
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FWHM	Largura à meia altura (<i>Full Width at Half Maximum</i>)
IV	Índices de vegetação
LCD	Display de cristal líquido (<i>Liquid Cristal Display</i>)
LED	Diodo emissor de luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
NDVI	Índice Vegetativo de Diferença Normalizada
PROVISAGRO	Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial
RPA	Aeronave remotamente pilotada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.1. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. <i>Objetivo geral</i>	17
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	17
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE	17
1.4. REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM NOVO SENSOR ÓPTICO ATIVO MULTIESPECTRAL NAS MEDIÇÕES DAS RESPOSTAS ESPECTRAIS EM AMBIENTE DE LABORATÓRIO	20
2.1. INTRODUÇÃO	20
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	22
2.2.1. <i>Desenvolvimento do sensor ativo multiespectral</i>	22
2.2.2. <i>Avaliação de desempenho do ReflecSense</i>	27
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
2.3.1. <i>Resultados do desempenho do ReflecSense com alvos sintéticos</i>	31
2.3.2. <i>Resultados do desempenho do ReflecSense com alvos naturais</i>	34
2.3.3. <i>Resultado da avaliação da estabilidade das determinações de reflectância sob condições de variação de iluminação</i>	37
2.3.4. <i>Resultado da avaliação da estabilidade das medições de reflectância com o tempo de uso</i>	38
2.4. CONCLUSÕES	41
2.5. REFERÊNCIAS	41
CAPÍTULO 3: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SENSOR ÓPTICO MULTIESPECTRAL NA AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DA CULTURA DO MILHO EM CAMPO	44
3.1. INTRODUÇÃO	44
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	46
3.2.1. <i>Descrição da área de estudo</i>	46
3.2.2. <i>Especificação técnica dos sensores</i>	47
3.2.3. <i>Obtenção dos dados de campo</i>	48
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.4. CONCLUSÕES	55
3.5. REFERÊNCIAS	55
CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL	58
APÊNDICES	59
APÊNDICE 1. VARIÇÃO, AO LONGO DE 12 SEMANAS, DAS MEDIDAS DE REFLECTÂNCIA FEITAS PELO SENSOR REFLECSense DE 15 SUPERFÍCIES HOMOGÊNEAS E UNIFORMES, PARA OITO COMPRIMENTOS DE ONDA MEDIDOS PELO MESMO SENSOR.	59
APÊNDICE 2. DEPÓSITO DE PEDIDO DE PATENTE NÚMERO BR 10 2020 011013 6	62
<i>Relatório descritivo</i>	66
<i>Reivindicações</i>	74

<i>Figuras</i>	76
<i>Resumo</i>	82

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

No relatório das Nações Unidas (ONU), intitulado *Perspectivas da população mundial 2019 (The World Population Prospects 2019)*, é estimado que a população humana deva aumentar de 7,7 bilhões para 9,7 bilhões entre 2019 e 2050 (ONU, 2019). Diante disso, estima-se que a produção agropecuária terá que duplicar para se ter segurança alimentar (FAO, 2020a; 2020b; WU et al., 2018). Estas estimativas se tornam um grande desafio, haja vista que a atividade agropecuária tem dificuldade em aumentar a produção e simultaneamente reduzir impactos ambientais e usar menos os insumos.

Os produtores agropecuários sofrem pressões políticas e sociais decorrentes de ser a atividade agropecuária uma atividade econômico poluidora e de degradação. É uma atividade de emissão considerável de gases de efeito estufa, que produz grande volume de resíduos. Em algumas circunstâncias, o aumento da produção é atingido com um maior uso de insumos, em especial os nitrogenados, implicando aumento do custo de produção e poluição de recursos hídricos (BURDON et al., 2019; SOARES et al, 2020).

O desmatamento tem aumentado em vários países produtores agropecuários. A degradação tem por fins o comércio de madeira, a mineração e a incorporação de novas áreas de pasto e/ou novas áreas agricultáveis. Em alguns casos, o desmatamento para fins agrícolas está associado a uma baixa produtividade, e a incorporação de novas áreas tem por objetivo aumentar a produção da propriedade como um todo.

Neste cenário se torna crescente a necessidade de aumentar a produtividade com o mínimo impacto ambiental. Para tal, o monitoramento espacial e temporal da atividade econômica implantada é fundamental. Para isso, é indispensável a aplicação das tecnologias da agricultura de precisão (AP). O uso de sensores ópticos espectrais, uma das tecnologias de AP, tem se provado uma ferramenta muito útil para a coleta de dados espaciais e temporais do ambiente e da cultura. Estes dados, ao serem interpretados possibilitam uma tomada de decisão agrícola favorável à produção com mínimo impacto ambiental, aliado à melhor eficiência de uso de insumos, sendo que,

em muitos casos, o aumento de produtividade é alcançado (DENG et al., 2018; HU et al., 2019; ZERGER et al., 2010). Para aumentar a produtividade e otimizar o uso de insumos, é necessário observar como se comporta a cultura agrícola de acordo com o clima e solo e com os estímulos da ação humana.

A nutrição das plantas, seguramente, é um dos fatores que interferem na produtividade e na qualidade dos produtos agrícolas. Um macronutriente, o nitrogênio, é fundamental no processo de fotossíntese, considerando que ele é intrínseco para a formação da clorofila (MACEDO et al., 2012). O fornecimento de nutrientes, em quantidades adequadas, em especial o nitrogênio, é de grande importância, uma vez que a deficiência deles provoca nas plantas capacidade fotossintética reduzida e baixo ganho de biomassa e de produtividade (BASSO et al., 2015; MARINO, et al., 2016).

Há disponíveis no mercado sensores ópticos portáteis espectrais que monitoram a saúde da planta. A adoção desses sensores no manejo das culturas permite, por exemplo, a quantificação da necessidade de adubação nitrogenada, otimizando o uso desse macronutriente. Dispositivos como: câmera MicaSenser, GreenSeeker, N-Sensor, e Crop Circle são alguns exemplos destes sensores. A informação monitorada neles constitui da leitura da radiância emitida pela planta em diferentes bandas do espectro eletromagnético, sendo expressa a informação de maneira mais intuitiva como índices de vegetação, que representam uma relação matemática da reflectância da superfície em dois ou mais comprimentos de onda do espectro (ADHIKARI et al., 2020; HABIBULLAH et al., 2020; WANG et al., 2020).

Apesar da função e o benefício, os sensores ópticos comerciais são de alto custo e pouco acessíveis à grande maioria dos agricultores em países em desenvolvimento, sobretudo por serem equipamentos importados, o que reduz a adoção da tecnologia. Um fato importante a se considerar é que são estes países, justamente, os maiores produtores agrícolas, que respondem por mais de 70% do uso de N na fertilização (CLAIN et al., 2012). Outro ponto é que quanto mais bandas espectrais um sensor é sensível, mais dados relevantes do alvo são obtidos, porém maior o custo de aquisição.

Diante do apresentado, é possível notar a necessidade de desenvolver sensores espectrais de ampla resolução espectral de baixo custo. O baixo custo favorece a adoção da tecnologia e o aumento do uso pelos agricultores. Como consequência,

tem-se otimização do uso de insumos, melhor qualidade dos produtos agrícolas, mínimos impactos ambientais e em muitos casos aumento de produtividade.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Objetivou-se com o presente trabalho desenvolver um sensor ativo portátil multiespectral com sensibilidade em dez bandas do espectro eletromagnético para o monitoramento de plantas.

1.2.2. Objetivos específicos

Verificar a confiabilidade do sensor em ambiente de laboratório e de campo.

Verificar a capacidade de determinar a reflectância em dez bandas espectrais de plantas e de solo, independentemente da variação da iluminação no ambiente de medida.

Validar o uso do sensor tanto em laboratório quanto em ambiente de campo.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese foi organizada em quatro capítulos. No primeiro, foi apresentada uma introdução geral justificando o desenvolvimento deste trabalho, bem como outras considerações julgadas importantes.

No segundo capítulo, foi descrita a construção e o estudo a respeito do desempenho do sensor ativo portátil multiespectral, denominado ReflecSense, na medição da reflectância em dez comprimentos de ondas do espectro eletromagnético, em ambiente de laboratório. Um estudo do desempenho do sensor ReflecSense na medição de NDVI (Índice Vegetativo de Diferença Normalizada) para a cultura de milho, em ambiente de campo, foi apresentado no terceiro capítulo. No último capítulo foi apresentada a conclusão geral da tese.

1.4. REFERÊNCIAS

ADHIKARI, R.; LI, C.; KALBAUGH, K.; NEMALI, K. A low-cost smartphone controlled sensor based on image analysis for estimating whole-plant tissue nitrogen (N) content in floriculture crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.169, n.1, p.1-9, 2020.

BASSO, B.; FIORENTINO, C.; CAMMARANO, D.; SCHULTHESS, U. Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. **Precision Agriculture**, v.17, n.2, p. 168-182, 2015.

BURDON, F.J.; MUNZ, N.A.; REYES, M.; FOCKS, A.; JOSS, A.; RÄSÄNEN, K.; ALTERMATT, F.; EGGEN, R.I.L.; STAMM, C. Agriculture versus wastewater pollution as drivers of macroinvertebrate community structure in streams. **Science of The Total Environment**, v.659, n.1, p. 1256-1265, 2019.

CRAIN, J.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; RAUN, B. Evaluation of a Reduced Cost Active NDVI Sensor for Crop Nutrient Management. **Journal of Sensors**, v.2012, 10p., 2012.

DENG, L.; HAO, X.; MAO, Z.; YAN, Y.; SUN, J.; ZHANG, A. A Subband Radiometric Calibration Method for UAV-Based Multispectral Remote Sensing. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n.8, p.2869-2880, 2018.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. **How to Feed the World in 2050**. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2020a.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. **Global agriculture towards 2050**. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2020b.

HABIBULLAH, M.; MOHEBIAN, M.R.; SOOLANAYAKANAHALLY, R.; WAHID, K.A.; DINH, A. A Cost-Effective and Portable Optical Sensor System to Estimate Leaf Nitrogen and Water Contents in Crops. **Sensors**, v.20, n.5, p.1-16, 2020.

HU, J.; PENG, J.; ZHOU, Y.; XU, D.; ZHAO, R.; JIANG, Q.; FU, T.; WANG, F.; SHI, Z. Quantitative Estimation of Soil Salinity Using UAV-Borne Hyperspectral and Satellite Multispectral Images. **Remote Sensing**, v.11, n.7, p.736-751, 2019.

MACEDO, C.H.O.; ANDRADE, A.P.; SANTOS, E.M.; SILVA, D.S.; SILVA, T.C.; EDVAN, R.L. Perfil fermentativo e composição bromatológica de silagens de sorgo em função da adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.13, n.2, p.371-382, 2012.

MARINO, D.; ARIZ, I.; LASA, B.; SANTAMARÍA, H.; FERNÁNDEZ-IRIGOYEN, J.; GONZÁLEZ-MURUA, C.; TEJO, P. M. A. Quantitative proteomics reveals the importance of nitrogen source to control glucosinolate metabolism in Arabidopsis

thaliana and Brassica oleracea. **Journal of Experimental Botany**, v.67, n.11, p. 3313-3323, 2016.

ONU - Nações Unidas. **World Population Prospects 2019**. Data Booklet. Disponível em: < <http://www.europeanmigrationlaw.eu/documents/UN-WorldPopulationProspects2019-Databooklet.pdf>>. Acesso em: 04 de novembro de 2020.

SOARES, E.C.; SILVA, A.C.; CRUZ, M.A.S.; SANTOS, E.L.; OLIVEIRA, T.R.; SILVA, T.J.; RIAL, E.P.; SILVA, R.N.; SILVA, J.V. Expedition on the Lower São Francisco: An X-ray of fisheries and agriculture, pollution, silting and saline intrusion. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.1, p. 3047-3064, 2020.

WANG, L.; DUAN, Y.; ZHANG, L.; WANG, J.; LI, Y.; JIN, J. LeafScope: A Portable High-Resolution Multispectral Imager for In Vivo Imaging Soybean Leaf. **Sensors**, v.20, n.8, p. 1-16, 2020.

WU, W., YU, Q., YOU, L., CHEN, K., TANG, H., LIU, J. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion. **Land Use Policy**, v. 76, n.1, p. 515-525, 2018.

ZERGER, A., ROSSEL, R. A. V., SWAIN, D.C., WARK, T., HANDCOCK, R. N., DOERR, G. J., BISHOP-HURLEY, G. J., DOERR, E. D., GIBBONS, P. G., LOBSEY, C. Environmental sensor networks for vegetation, animal and soil sciences. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.12, n.5, p. 303-316, 2010.

CAPÍTULO 2: Avaliação do desempenho de um novo sensor óptico ativo multiespectral nas medições das respostas espectrais em ambiente de laboratório

2.1. INTRODUÇÃO

Diferentes tipos de superfícies, tais como água, vegetação e solo descoberto, refletem a radiação incidente sobre elas de forma diferente, em vários comprimentos de onda. A radiação refletida em função do comprimento de onda é denominada assinatura espectral da superfície. Identificar padrões de reflectâncias de uma superfície, tal como sua assinatura espectral, é uma importante ferramenta de análise, pois possibilita identificar padrões de aspectos químicos e biológicos, bem como comportamento normal ou atípico, caso a superfície seja um ser vivo.

Uma planta saudável, por exemplo, tem assinatura espectral bem caracterizada com reflectância no comprimento de onda da cor verde (550 nm) e do infravermelho próximo (850 nm) com valores maiores que a reflectância nos comprimentos do azul (450 nm) e vermelho (650 nm). Qualquer modificação deste padrão de reflectância nas plantas pode indicar estresse e baixa taxa fotossintética. Deste modo, um produtor agrícola pode utilizar a informação para aplicar um manejo que reduza perda de produtividade (KITIC et al., 2019; SOLIE et al., 2012, WHAG et al., 2020).

A quantidade de íons, umidade e matéria orgânica no solo afetam a reflectância, a absorção e a transmitância de ondas eletromagnéticas pelo solo (ADAMCHUK et al., 2004). A partir da assinatura espectral do solo é possível identificar macronutrientes e micronutrientes e determinar o teor de matéria orgânica, especialmente ao se observar a reflectância na região do espectro visível e infravermelho próximo (MAYRINK et al., 2019; SCHIRRMANN et al., 2013). Diante disto, a espectroscopia laboratorial pode se tornar uma alternativa aos métodos tradicionais de identificação de fertilidade, permitindo uma determinação rápida da fertilidade de solos.

Estudos mostram que modelos de predição fundamentados em reflectâncias na região do infravermelho próximo e do espectro do visível apresentaram resultados satisfatórios na quantificação de sólidos em suspensão (SS) em corpos hídricos (SAENZ et al. 2015; VERONEZ et al. 2018). No modelo proposto por Saenz et al.

(2015), foi explorada a relação entre bandas espectrais individuais e combinações matemáticas entre elas com finalidade de estimar a concentração de SS. Veronez et al. (2018) optaram por um modelo de predição de concentração de SS e matéria orgânica dissolvida com base em índices de vegetação como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) (GAO, 1996; MCFEETERS, 1996; ROUSE et al., 1973). Quantificar os sólidos em suspensão é importante no tratamento de água e na agricultura irrigada, pois evita o aumento dos custos de manutenção, uma vez que reduz a sedimentação nas redes de distribuição e caixas d'água e o entupimento de sistemas de gotejamento e de aspersão na agricultura.

Existem no mercado sensores ópticos multiespectrais que medem, de forma direta ou indireta, a reflectância de superfícies de corpos em determinadas bandas espectrais. O clorofilômetro SPAD-502 utiliza a transmitância nas bandas do espectro do vermelho e do infravermelho para determinar um índice de clorofila (MINOLTA, 1989). O GreenSeeker utiliza a reflectância da banda do vermelho (660 nm) e do infravermelho próximo (770 nm) para determinar o NDVI (KITIC et al., 2019). O N-Sensor utiliza a reflectância das bandas entre 450 nm e 900 nm para determinar a necessidade de adubação nitrogenada (MUÑOZ-HUERTA et al., 2013). Por último, o sensor Crop Circle ACS-470 faz a medida da reflectância em seis bandas espectrais com picos nos comprimentos de onda: 450 nm; 550 nm; 650 nm; 670 nm; 730 nm e >760 nm (CAO et al., 2013). Desses sensores, somente o Crop Circle possibilita acessar os dados de reflectâncias, o que é uma limitação aos outros, pois com os dados de reflectâncias é possível obter diferentes informações da superfície mensurada, não ficando preso somente à informação de um índice de vegetação específico.

Na necessidade de maiores precisões, existem sensores hiperespectrais. Esses podem medir a reflectância nos comprimentos de onda desde 325 a 1075 nm, com precisão de 1 nm. Além disso, foram desenvolvidos para serem usados em diferentes áreas científicas (FIELDSPEC, 2020).

Quanto maior é a resolução espectral (i.e., número de bandas) dos sensores, mais dados da superfície alvo são coletados. O problema é que o custo de aquisição desses sensores é mais elevado. Sendo o custo de aquisição uma variável relevante para adoção de qualquer tecnologia.

Nestas circunstâncias, torna-se necessário o desenvolvimento de sensores ópticos espectrais de baixo custo e de ampla resolução espectral. Esses sensores devem ser simples de usar para facilitar a utilização em áreas como a da agricultura. Desta forma, objetivou-se com este capítulo detalhar o desenvolvimento de um sensor ativo multiespectral e avaliar o desempenho desse na determinação da reflectância em dez bandas do espectro eletromagnético, em ambiente de laboratório.

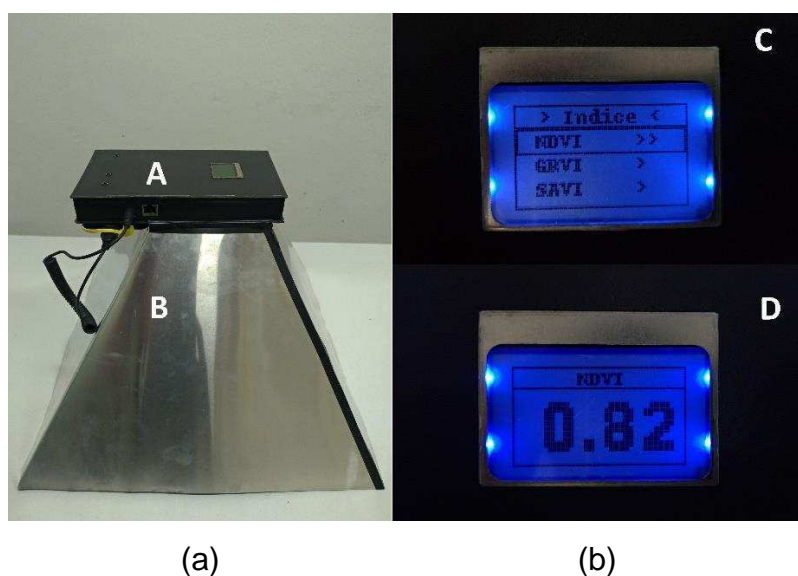
2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Desenvolvimento do sensor ativo multiespectral

O protótipo do sensor óptico ativo portátil multiespectral de uso laboratorial e de campo, denominado ReflecSense, é capaz de medir a reflectância de dez bandas do espectro eletromagnético com picos em: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810; e 860 nm; e 20 nm de FWHM (*Full Width at Half Maximum*). O custo de produção do sensor foi de US\$ 370 (cotação US\$ 1,00 igual a R\$5,60).

O ReflecSense (Figura 2.1) foi constituído por um circuito eletrônico que une um computador de placa única, conectado a um regulador de tensão, a um sistema de iluminação por LEDs, a um dispositivo óptico e a uma tela LCD (*Liquid Crystal Display*). O processo de medição da reflectância consiste em direcionar uma fonte de luz sobre o alvo a ser analisado, e o sensor converte a radiação refletida em pulso elétrico, e esse pulso é processado e convertido em valores de reflectância pelo computador de placa única.

Figura 2.1. Sensor óptico ativo portátil multiespectral, ReflecSense: (a) vista do sensor e (b) detalhe do menu de seleção de índices/reflectâncias. (A) capa plástica de proteção de todo o circuito eletrônico que se encontra interno e (B) tronco piramidal de quatro faces em alumínio, com objetivo de reduzir o excesso de iluminação externa. A base da pirâmide é o limiar da posição do sensor e o alvo. (C) detalhe do LCD mostrando o menu de interação com o usuário para a seleção entre medir índices ou medir reflectâncias e (D) exemplo do resultado da medida de NDVI de uma planta.



2.2.1.1. Fonte de luz que compõe o sensor ativo

A fonte de luz do sensor ReflecSense foi composta por um conjunto de três LEDs: um que emite radiação na faixa de comprimento de onda de 380 a 840 nm, com características nominais de 3 V, 3 W e 110 lm; um verde, com pico de emissão no comprimento de onda de 520 nm, 3 V, 3 W e 140 lm; e um infravermelho, com pico de emissão em 850 nm, 1,4 V, 3 W e 110 lm. O sistema foi responsável por emitir pulsos de luz sobre o alvo, com a finalidade de tornar o sensor ReflecSense ativo, ou seja, independente da iluminação ambiente. Para a emissão dos pulsos de luz, foi usado um relé eletromagnético de 3 V, servindo de chaveamento para alimentação dos LEDs por meio de uma fonte regulada a 5 V DC e por um regulador de tensão conectado a uma bateria de 2200 mAh. A cada pulso, os LEDs são acessados simultaneamente por 1 s.

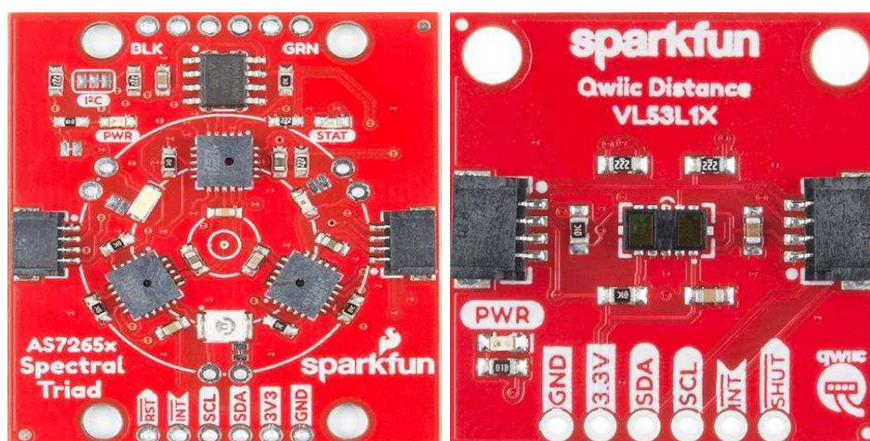
Para evitar que o aquecimento excessivo dos LEDs provocasse alteração do espectro de emissão, foi usado um dissipador de calor em alumínio e um *cooler* de 5V para a estabilização da temperatura. Os testes preliminares mostraram que o espectro de emissão dos LEDs não foi alterado com o uso extremo do sensor.

2.2.1.2. Detecção do espectro refletido pelo alvo

O diferencial do sensor ReflecSense, frente aos sensores multiespectrais existentes, é sua capacidade de medir as reflectâncias em dez comprimentos de onda. Para a obtenção dos comprimentos de ondas espectrais, foi utilizado o dispositivo óptico SparkFun Triad AS7265X (SPAKFUN, 2020). Para orientar o usuário do ReflecSense da distância do alvo, foi utilizado o dispositivo SparkFun VL53L1X.

O AS7265X é um dispositivo óptico de inspeção para uso *indoor*. É constituído por três matrizes de fotodiodos combinados com LEDs visíveis, ultravioleta e infravermelho próximo para iluminar e testar várias superfícies para espectroscopia de luz. É capaz de medir o espectro de 410 nm a 940 nm em 18 bandas individuais. Segundo o fabricante, apresenta um erro médio de medida de $\pm 12\%$ em cada comprimento de onda. O dispositivo VL53L1X é um sensor de distância. Ele é capaz de medir a distância de objetos desde 40mm a 4m com resolução milimétrica. A Figura 2.2 apresenta o dispositivo óptico AS7265X e o dispositivo VL53L1X.

Figura 2.2. Dispositivos SparkFun Triad AS7265X (a) e SparkFun VL53L1X (b).



(a)

(b)

Fonte: SPAKFUN (2020).

Os LEDs do dispositivo AS7265X não foram usados, visto sua baixa potência. Para substituí-los, foi construído o sistema de iluminação por LEDs de alta potência descrito no item 2.2.1.1. Também só foram usados dez canais de sinais elétricos do dispositivo óptico, pois oitros não obtiveram resultados satisfatório. Em teste preliminar, oitros canais, 410, 485, 510, 585, 610, 760, 900, 940 nm, obtiveram os erros de medições acima de 30%, não sendo, portanto, usados no ReflecSense.

No processo de calibração do ReflecSense, o AS7265X foi configurado para um tempo de integração de dados de 181 ms, nos dez canais de sinais elétricos responsáveis pelas dez bandas, com um ganho de sinal elétrico de 3,7 vezes. Tais configurações foram as que proporcionaram os melhores resultados alcançados pelo ReflecSense. A comunicação usada entre o AS7265X e o computador de placa única foi a I2C.

O dispositivo óptico AS7265X tem ângulo de abertura de 41° em cada uma das três matrizes de fotodiodos internos centrais. Diante disso, o ReflecSense foi construído de modo a ter a área da superfície visada equivalente a um círculo de 21,5 cm de diâmetro a uma distância do alvo de 27 cm.

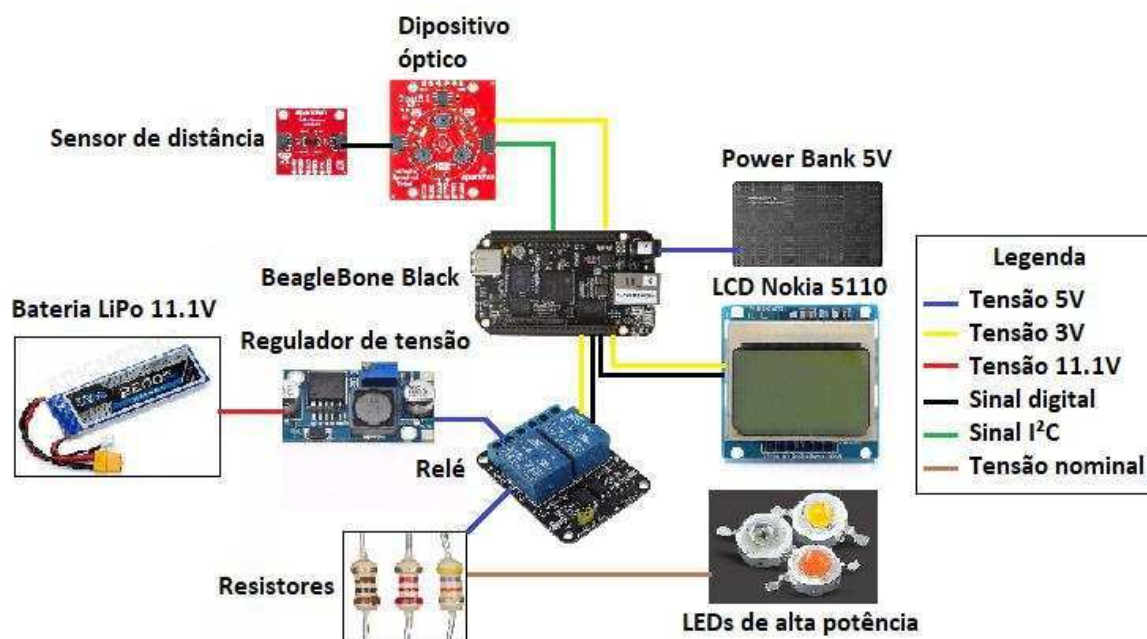
2.2.1.3. Processamento de dados do ReflecSense

O computador de placa única BeagleBone Black (BEAGLEBOARD, 2020), com sistema operacional Linux Debian 8.6, foi utilizado na construção do ReflecSense. A BeagleBone foi responsável pelo controle do sistema de iluminação por LEDs e do dispositivo óptico AS7265X, este usando comunicação I2C, bem como pelo processamento de dados e apresentação de dados para o usuário do ReflecSense. Para a execução de tais funções, foi criado um algoritmo em linguagem Python 2.7, o qual foi responsável pelas seguintes funções: conectar o dispositivo e realizar a leitura dele; acionar os LEDs; processar os dados recebidos; apresentar as informações pelo LCD e possibilitar a interação com o usuário.

O algoritmo foi criado para acionar os LEDs simultaneamente durante 1s e realizar uma leitura do dispositivo óptico AS7265X, com tempo de integração de 181 ms e 3,7 vezes de ganho de sinal, durante este intervalo de 1s. Tais características são desejáveis para melhor estabilidade da coleta de dados pelo ReflecSense. Na Figura 2.3 são representados de forma simplificada os componentes

do circuito eletrônico do ReflecSense, bem como as conexões e as comunicações do circuito.

Figura 2.3. Visão geral dos componentes, das conexões e das comunicações do circuito eletrônico do sensor ReflecSensor.



2.2.1.4. Calibração do sensor ReflecSense

Para a calibração do ReflecSense foi usado um spectralon branco de 99% de reflectância e um preto de 1% de reflectância. Também foram confeccionadas oito superfícies homogêneas e uniformes, 60x60 cm, de cores distintas por meio da impressora HP LaserJet CP1515n.

Foram feitas as medidas de reflectâncias das oitos superfícies pelo espectrorradiômetro FieldSpec HandHeld 2TM (Fieldspec, Malvern Panalytical Ltd., Reino Unido), seguindo a calibração e o processo de medição propostos pelo fabricante do espectrorradiômetro. A reflectância de cada superfície medida foi tomada como a exata.

De posse dos spectralons e das oitos superfícies, dentro de uma câmara com dimensões internas de 2,33 x 2,11 x 2,14 m, fechada e iluminada por duas lâmpadas halógenas de 300 W, 127 V e 8700 lm cada, foram feitas as medidas de reflectâncias pelo ReflecSense de cada uma das superfícies e dos spectralons. Todas as medidas

de cada superfície foram realizadas com o ReflecSense a 27 cm de distância do alvo, isto é, cada superfície estava na posição que coincidia com base plana do tronco piramidal em alumínio do ReflecSense (Figura 2.1 (a)).

O ReflecSense, em teste preliminar, mostrou melhor estabilidade e precisão de medidas quando o dispositivo óptico AS7265X foi configurado com o tempo de integração de 181 ms e ganho de sinal de 3,7 vezes. Configuração utilizada a 16bits.

De posse dos dez dados de reflectâncias, dois spectralon e oito superfícies, medidas pelo ReflecSense, e das dez reflectâncias exatas de cada superfície, foi realizada uma regressão polinomial de segundo grau para obter a equação de calibração para cada um dos dez comprimentos de onda medidos pelo ReflecSense. De posse das equações, estas foram adicionadas ao algoritmo do ReflecSense.

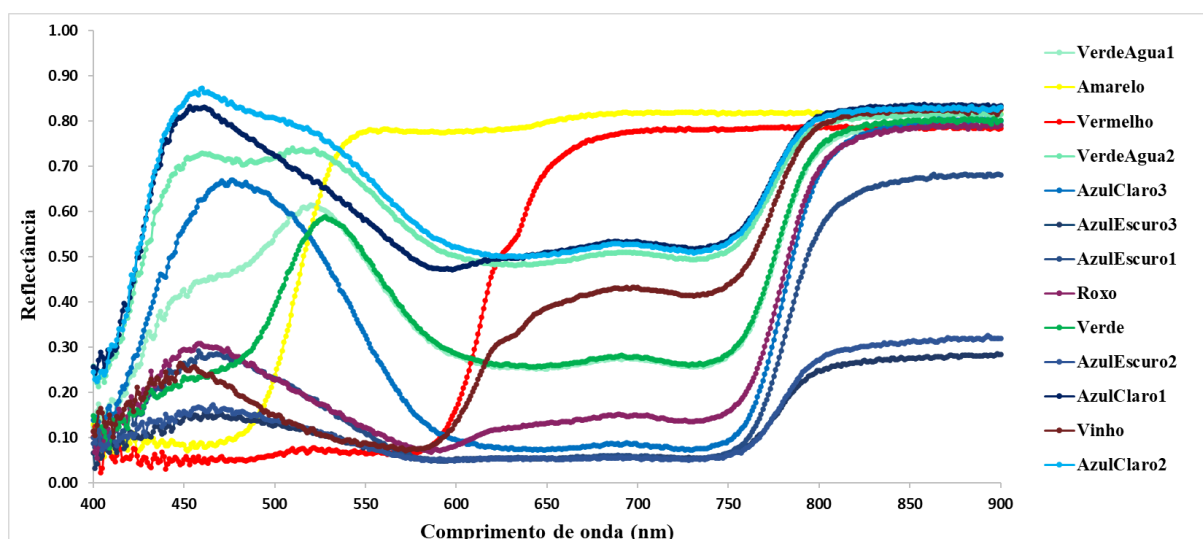
2.2.2. Avaliação de desempenho do ReflecSense

Para avaliar o desempenho do sensor ReflecSense foi montado um experimento em ambiente de laboratório. Para tal, foram comparadas as suas medições espectrais com o sensor de alta precisão e exatidão, o espectrorradiômetro FieldSpec HandHeld 2TM (Fieldspec, Malvern Panalytical Ltd., Reino Unido). Esse tem a capacidade de medir a reflectância de superfícies nos comprimentos de onda desde 325 a 1075 nm, com precisão de ± 1 nm.

2.2.2.1. Avaliação do desempenho com alvos sintéticos

Foram confeccionados 13 padrões de cores homogêneas e uniformes nas dimensões de 60 x 60 cm por meio da impressora HP LaserJet CP1515n. A assinatura espectral de cada padrão foi obtida utilizando o espectrorradiômetro HandHeld 2TM (Figura 2.4).

Figura 2.4. Assinatura espectral de 13 padrões de cores obtidas pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM.



Foi montado um experimento dentro de uma câmara com dimensões internas de 2,33 x 2,11 x 2,14 m. O objetivo de uso da câmara foi eliminar as interferências da iluminação externa no experimento. A câmara foi mantida fechada durante toda a coleta de dados. A única fonte de iluminação interna e constante foram duas lâmpadas halógenas de 300 W, 127 V e 8700 lm cada.

Cada padrão de cor foi fixado em uma superfície plana no interior da câmara. Em seguida, foi obtida a reflectância de toda a superfície de cada um dos 13 padrões pelo espectrorradiômetro. Posteriormente, foram feitas as medidas das reflectâncias das mesmas superfícies pelo sensor ReflecSense. A reflectância de cada superfície foi definida pela média de cinco repetições.

No teste preliminar, o sensor ReflecSense foi sensível à distância do alvo. Para sanar o problema, o sensor foi construído com o propósito de efetuar medidas somente à distância de 27 cm do alvo. Portanto, durante as coletas de dados, todas as medidas de cada superfície foram realizadas a 27 cm de cada padrão de cor, isto é, cada superfície estava na posição que coincidia com base plana do tronco piramidal em alumínio do ReflecSense. Por fim, de posse dos dados de reflectância de ambos os sensores, foi extraído o indicador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), tomando as leituras do espectrorradiômetro como as exatas, e realizada uma análise de correlação de Pearson com nível de significância de 1% ($p < 0,01$).

2.2.2.2. Avaliação do desempenho com alvos naturais

Foram selecionadas para este experimento amostras de folhas de café Catuaí vermelho (*Coffea arabica* L.), folhas de milho (híbrido BM 812 PRO2) e de quatro solos com constituição química distintas (Figura 2.5). As folhas e os solos foram distribuídos de forma homogênea sobre uma área de 60 x 60 cm de um suporte plano de fundo preto.

Figura 2.5. Amostras vegetais e de solos.



Inicialmente, para cada amostra de folha e de solo, foram realizadas dez medições de reflectância com o ReflecSense em ambiente de laboratório sem controle de iluminação, isto é, iluminação artificial por lâmpadas fluorescentes somada à natural oriunda das janelas. Posteriormente, as mesmas amostras foram levadas para a mesma câmara do item 2.2.2.1, de onde foram medidas as reflectâncias dessas usando o espectrorradiômetro, em ambiente com iluminação controlada e estabilizada pelas mesmas duas lâmpadas halógenas descritas no item 2.2.2.1. Os valores medidos pelo espectrorradiômetro foram tomados como os valores exatos de reflectância dos seis alvos naturais.

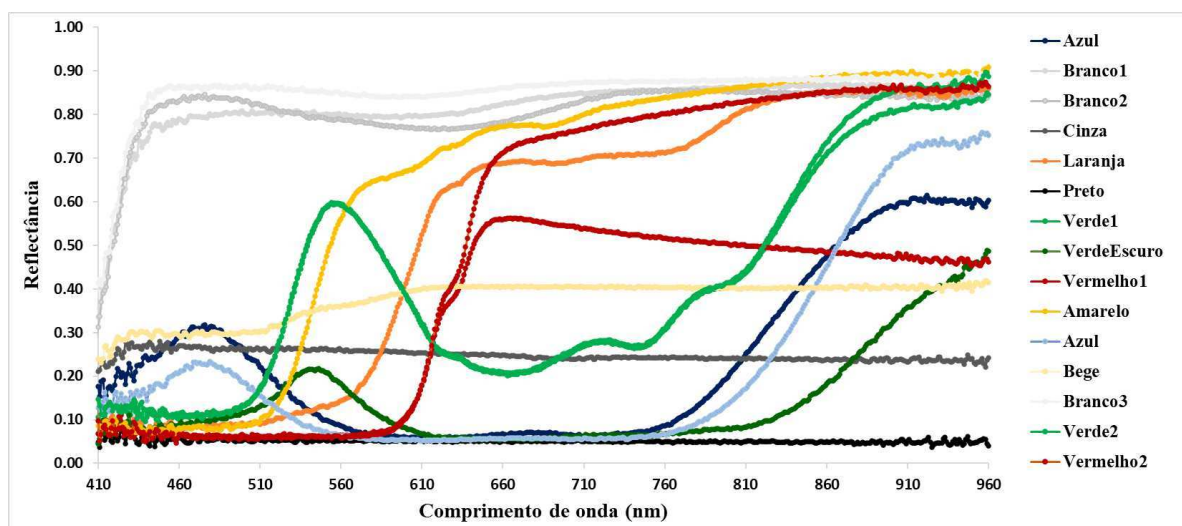
De posse dos dados de reflectâncias dos dois sensores, foi extraído o indicador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para verificar a exatidão das medidas de reflectância feitas pelo ReflecSense. O cálculo do desvio padrão, em torno das dez medidas de reflectância para cada alvo, foi usado para verificar a precisão das

medidas de reflectância nos dez comprimentos de onda do espectro eletromagnético medidos pelo ReflecSense.

2.2.2.3. Avaliação da estabilidade das medições de reflectância sob condições de variação de iluminação

Para verificar a influência da iluminação ambiente nas medições com o ReflecSense, foi realizado um experimento na mesma câmara já descrita. Para tal análise, foram confeccionados 15 novos padrões de cores a partir de 15 novas superfícies uniformes e homogêneas. As novas superfícies foram confeccionadas devido à perda das 13 superfícies iniciais bem como da impressora HP LaserJet CP1515n, decorrente do incidente de alagamento do laboratório de análise. As novas superfícies foram constituídas de painéis planos de madeira compensada 60 x 60 cm coberta por napa sintética em *Polyvinyl chloride* (PVC). Na Figura 2.6 é apresentada a assinatura espectral das 15 novas superfícies.

Figura 2.6. Assinatura espectral de 15 novos padrões de cores medidos pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM.



Foi montado um experimento em Delineamento em Blocos Casualizados (DBC) composto por 2 tratamentos e 15 blocos. Os tratamentos foram as condições de iluminação do ambiente de medida da reflectância, isto é, o ambiente no escuro e com o ambiente iluminado por duas lâmpadas halógenas de 300 W, 127 V, 8700 lm cada. Os tratamentos foram aplicados aleatoriamente. Os blocos foram cada padrão de cor,

totalizando 15 repetições para cada tratamento. Por fim, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com 1% de nível de significância para qualificar o efeito da iluminação sobre as medidas das reflectâncias.

2.2.2.4. Avaliação da estabilidade das medições de reflectância com o tempo de uso

Durante 12 semanas foi realizado um experimento para avaliar a estabilidade temporal das leituras do ReflecSense. Para tal avaliação, três vezes por semana foram feitas medições de reflectâncias, das mesmas 15 superfícies uniformes e homogêneas descritas no item 2.2.2.3, com o ReflecSense e com o espectrorradiômetro. As medidas foram repetidas cinco vezes.

As medidas de reflectância feitas pelo espectrorradiômetro para todas as 15 superfícies mantiveram-se constantes durante as 12 semanas, mostrando, portanto, que as superfícies não sofreram alterações durante o experimento. As medições do espectrorradiômetro foram tomadas como as medidas exatas.

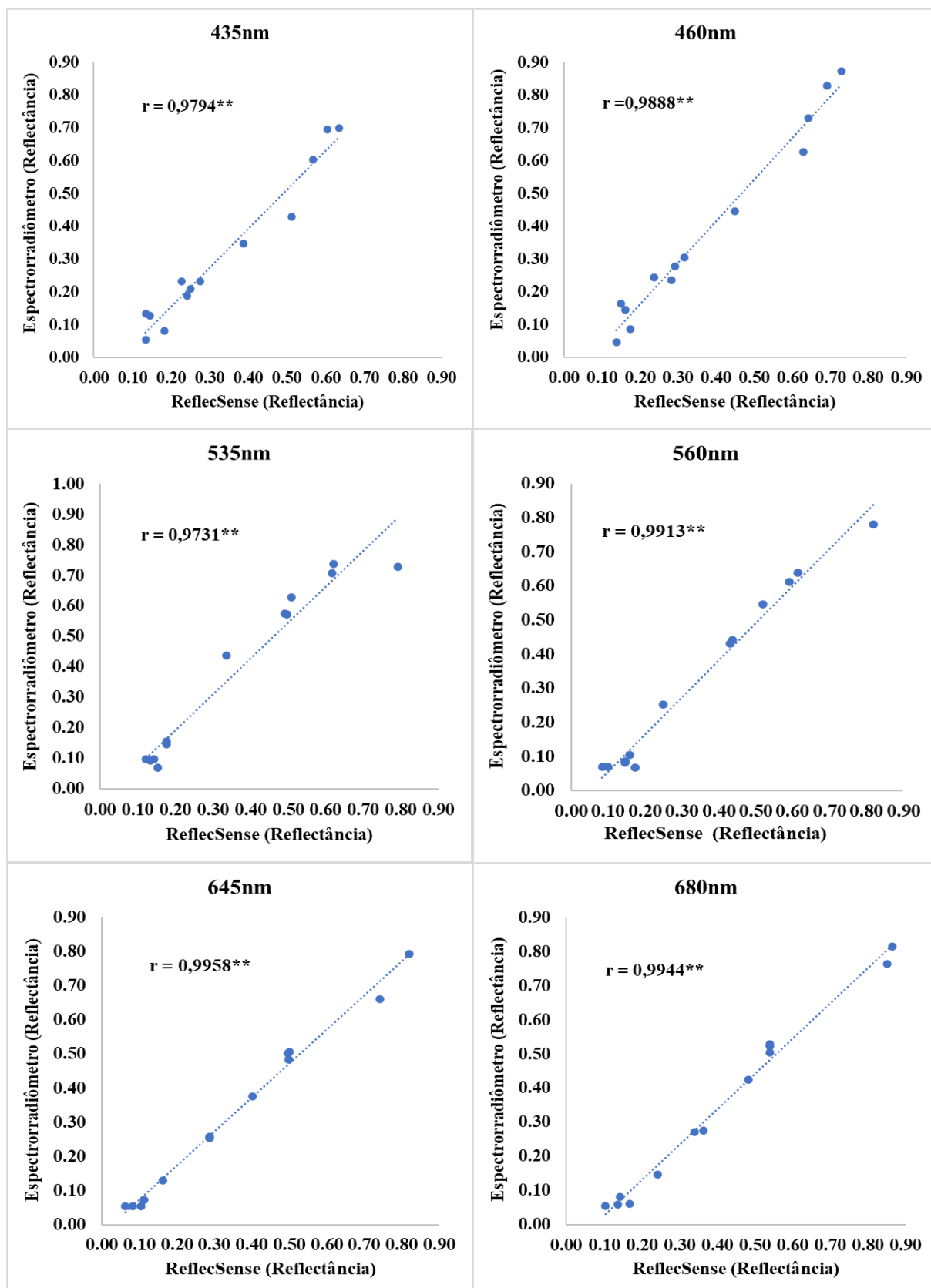
De posse dos dados de reflectâncias dos dois sensores, foi extraído o indicador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e verificada a variação deste erro ao longo das 12 semanas. Também foi extraída a média, a mediana e a moda do conjunto de dados de 12 semanas para cada uma das 15 superfícies, nos dez comprimentos de onda medidos pelo ReflecSense. Todas as análises estatísticas neste trabalho foram realizadas por meio de linguagem R no software RStudio (R CORE TEAM, 2019).

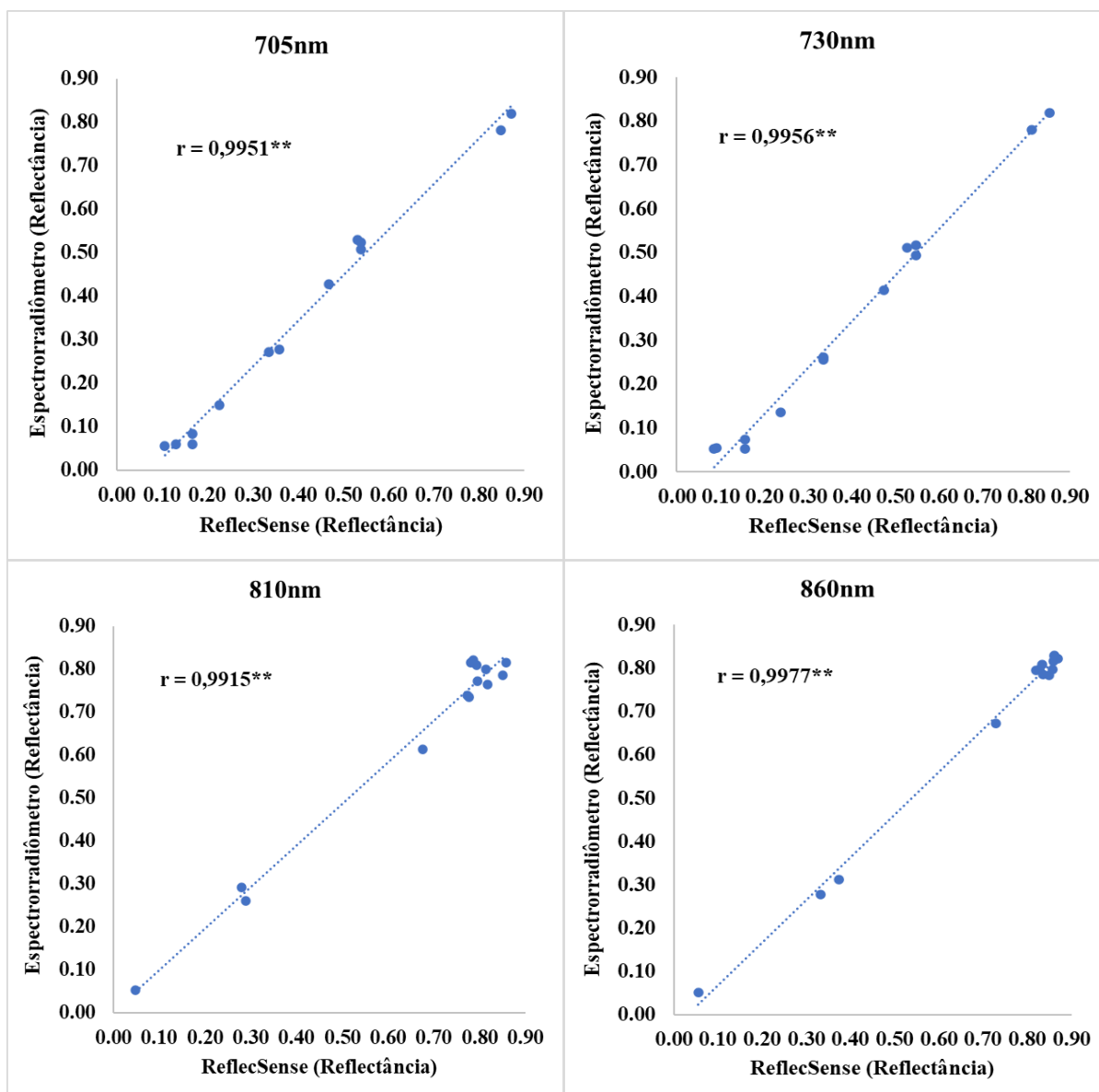
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Resultados do desempenho do ReflecSense com alvos sintéticos

Na Figura 2.7 são apresentados os gráficos da comparação entre as reflectâncias dos 13 padrões de cores medidas pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM com as do ReflecSense, para cada uma das dez bandas espectrais avaliadas.

Figura 2.7. Comparação entre as reflectâncias medidas pelo espectrorradiômetro com as do ReflecSense para 13 padrões de cores para os dez comprimentos de ondas medidos pelo sensor ReflecSense.





****** Coeficiente de correlação de Pearson significativo a 1% ($p < 0,01$).

A comparação entre as medições de reflectância feitas pelo ReflecSense com as feitas pelo espectrorradiômetro revelou uma forte correlação entre os dois sensores, todos os coeficientes de correlação Pearson (r) acima de 0,97. Na Figura 2.7, nota-se que o menor coeficiente de correlação foi de 0,9731 e o maior, 0,9977, significando um alto grau de associação linear positiva entre as variáveis.

Outro ponto, ao analisar os resultados apresentados na Figura 2.7, é o fato dos altos valores de coeficientes de correlação de Pearson evidenciarem que o ReflecSense tem precisão. Quanto ao comportamento do ReflecSense a respeito da exatidão das medições de reflectâncias, o uso do indicador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) é o adequado para a obtenção da informação de exatidão.

O maior RMSE foi de 0,076 para o comprimento de onda de 535 nm e o menor para o comprimento de 645 nm, no valor de 0,036. É importante notar que nas respostas espectrais da vegetação os comprimentos de maior interesse em muitos índices de vegetação são o do vermelho (645 nm) e o do infravermelho próximo (860 nm), com RMSE = 0,039, e são justamente estes comprimentos de onda os de menor erro na medida de refletância pelo ReflecSense. Portanto, estes resultados reforçam o potencial do uso do Reflecsense na identificação das características espectrais de vegetação. As diferenças de erros entre os comprimentos de onda podem estar relacionadas às diferenças de ruídos elétricos em cada fotodiodo de cada comprimento.

Os ruídos são uma característica interna de fabricação do dispositivo óptico AS7265X, sendo esse um dispositivo de baixo custo. Outro fato é o erro de $\pm 12\%$ declarado pelo fabricante do dispositivo AS7265X e, por ser também uma característica interna do dispositivo, influencia nas medições de refletância. O ReflecSense foi construído de forma a minimizar ao máximo os erros e os ruídos. Usa um sistema de iluminação a LEDs robusto e com controle de temperatura que ajuda a minimizar os erros e ruídos e a obter medidas precisas. O maior RMSE, 0,076, não foi alto, sobretudo por estar sendo comparadas as medidas feitas pelo ReflecSense, um sensor de construção eletrônica simples, com um sensor de grande exatidão e de construção eletrônica complexa, o espectrorradiômetro. Isso evidencia que o ReflecSense apresenta boa exatidão.

Diante do apresentado, os resultados revelam o potencial de uso do sensor ReflecSense para medições rápidas e confiáveis da refletância de superfícies em ambiente laboratorial, especialmente superfícies vegetais.

2.3.2. Resultados do desempenho do ReflecSense com alvos naturais

Na Figura 2.8 é apresentada a comparação entre a assinatura espectral gerada pelos dados de refletância medidos pelo ReflecSense e os dados medidos pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM, para os alvos naturais: folhas de café, folha de milho e quatro solos distintos. Os erros e o desvio padrão das medidas de refletâncias feitas pelo ReflecSense em torno da média de dez medidas para os mesmos seis alvos naturais são apresentados na Tabela 2.1.

Figura 2.8. Comparação da assinatura espectral gerada com os dados medidos pelo ReflecSense com os medidos pelo espectrorradiômetro para seis alvos naturais.

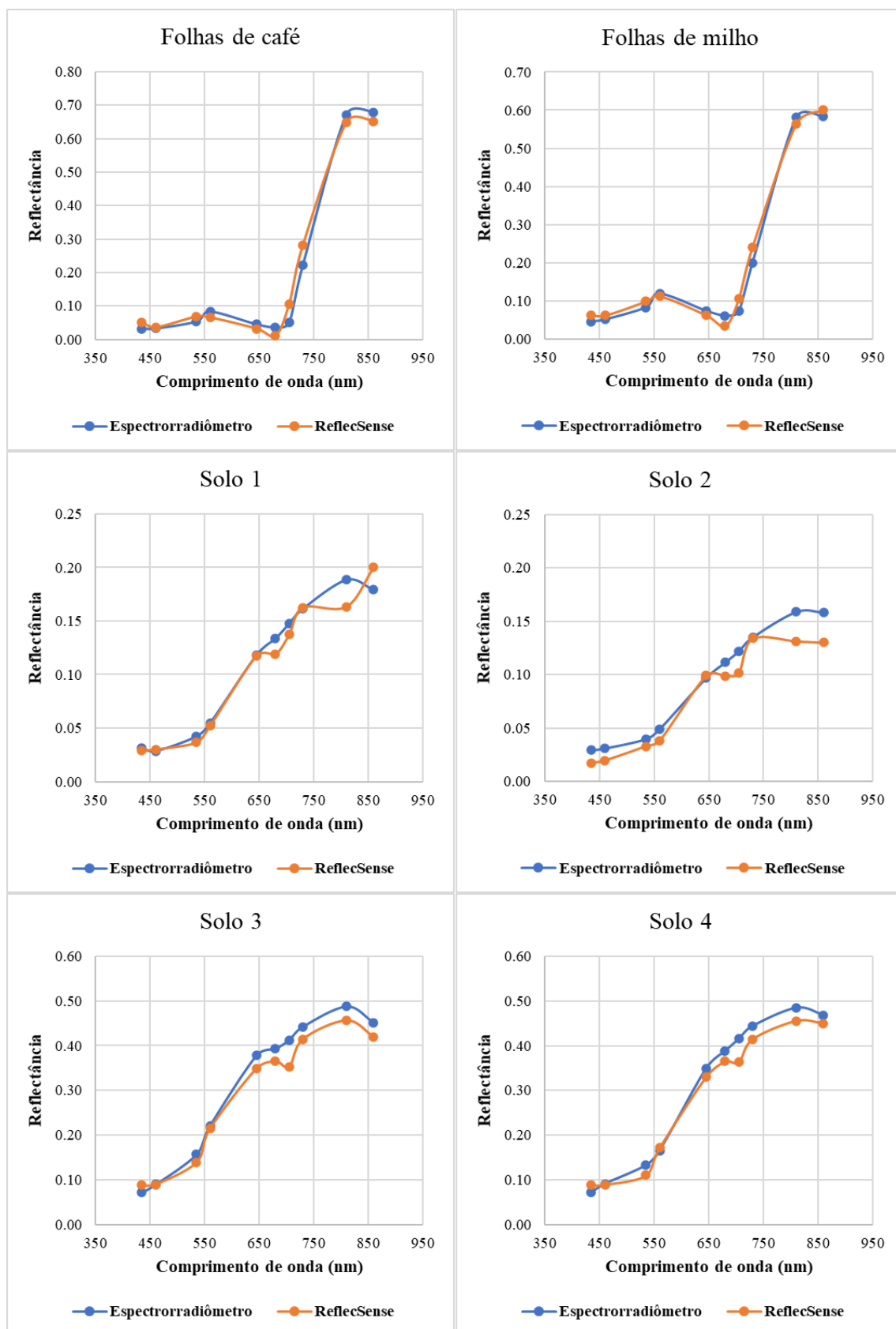


Tabela 2.1. Resultados da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e do desvio padrão na determinação de reflectância pelo ReflectoSense para seis alvos naturais

Comprimento de onda (nm)		435	460	535	560	645	680	705	730	810	860
Café	RMSE	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,03	0,06	0,06	0,02	0,03
	Desvio padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Milho	RMSE	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02
	Desvio padrão	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Solo 1	RMSE	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,03	0,02
	Desvio padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo 2	RMSE	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03
	Desvio padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo 3	RMSE	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03
	Desvio padrão	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Solo 4	RMSE	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02
	Desvio padrão	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Na Figura 2.8 é possível observar que a assinatura espectral gerada pelo sensor ReflecSense tem tendência de ter a mesma forma que a gerada pelo espectrorradiômetro HandHeld 2TM. Tal evidência é comprovada com a Tabela 2.1, em que o maior valor de RMSE foi 0,06 para a amostra de folhas de café nos comprimentos de onda 703 e 730 nm. Isso evidencia um alto grau de associação entre os sensores, exatamente como foi o observado no item 2.3.1.

É importante notar que, para as amostras vegetais, as respostas espectrais nos comprimentos de onda 645 nm (vermelho), 435 nm (azul), 560 nm (verde) e 860 nm (infravermelho próximo) tiveram valores baixos de erro de medidas de reflectâncias, com destaque de menor erro para o comprimento de 645 nm, com RMSE igual a 0,01 para ambos tipos de folhas, e o maior erro para o comprimento de 860 nm nas folhas de café, com RMSE igual a 0,03. São esses os comprimentos de onda que constituem as respostas espectrais de maior interesse para as plantas, em especial no aspecto fotossintético (ASAARI et al., 2018; KITIC et al., 2019; WU et al., 2019). Tais resultados são importantes, pois, assim como os obtidos no item 2.3.1, confirmam o potencial do uso do ReflecSense no monitoramento das respostas espectrais de plantas. Mesmo

tendo construção simples, o sensor ReflecSense apresenta aproximação dos valores medidos pelo espectrorradiômetro.

Pela Tabela 2.1 os quatros tipos diferentes de solos tiveram erros semelhantes e baixos, com destaque do maior RMSE igual a 0,05 para o comprimento de onda de 705 nm dos solos 3 e 4. Algo interessante de se observar, é que os solos 1 e 2, de horizonte A, apresentaram comportamento de erros iguais na maioria dos comprimento de onda, o mesmo acontece para os solos 3 e 4, de horizonte B. Isso leva a inferir que o ReflecSense tem comportamento variável dos erros, de acordo com a constituição orgânica mineral dos solos.

O desvio padrão, para os seis alvos naturais, foi na maioria dos comprimentos de onda, igual a zero, com poucas exceções igual a 0,01 (Tabela 2.1). Isso mostra que a dispersão em torno da média é desprezível, o que evidencia excelente precisão na coleta de dados pelo ReflecSense. Nas medidas de reflectância para cada um dos dez comprimentos de ondas, as dez repetições foram iguais na maioria dos dados.

Diante do apresentado, estes resultados somados aos do item 2.3.1. revelam o potencial de uso do sensor ReflecSense para medições da refletância de solos e plantas em ambiente de laboratório. A partir dos resultados, pode-se inferir que em ambiente de campo o ReflecSense tem potencial de obter um bom desempenho também, o que deve ser averiguado.

2.3.3. Resultado da avaliação da estabilidade das determinações de reflectância sob condições de variação de iluminação

Na Tabela 2.2 são apresentados os valores médios de reflectâncias para cada tratamento, nos dez comprimentos de onda medidos pelo sensor ReflecSense, em função da variação de iluminação no ambiente. As medidas de reflectâncias foram realizadas em ambiente iluminado por duas lâmpadas halógenas e posteriormente em ambiente escuro, ou seja, na ausência de qualquer iluminação.

Tabela 2.2. Valores médios de reflectâncias, para 15 superfícies de cores, medidas com ausência de iluminação e com iluminação, para cada um dos dez comprimentos de onda medidos pelo ReflecSense

Comprimento de onda (nm)	435	460	535	560	645	680	705	730	810	860
Escuro	0,255	0,286	0,307	0,322	0,386	0,407	0,408	0,418	0,527	0,585
Iluminação	0,255	0,283	0,306	0,321	0,385	0,406	0,41	0,418	0,527	0,583
Média	0,255	0,285	0,306	0,321	0,385	0,407	0,409	0,418	0,527	0,584
p-valor**	0,41	0,15	0,18	0,33	0,14	0,16	0,23	0,71	0,36	0,12

** As médias não se diferenciaram entre si pelo teste F ($p > 0,01$).

Por meio da análise dos resultados apresentados na Tabela 2.2, obtidos da ANOVA, as medidas de reflectâncias, feitas pelo ReflecSense, não foram afetadas pela variação da iluminação do ambiente. Isso mostra que o algoritmo criado para o controle da iluminação associado ao conjunto de LEDs foi suficiente para torná-lo um sensor ativo. Os valores de reflectância no escuro foram, na maioria dos dados, iguais às medidas em ambiente iluminado. Nas que foram diferentes, as diferenças foram pequenas, sendo que a maior variação foi de 9,13% (para o comprimento de onda de 560 nm) e a menor 0,40% (para o comprimento de onda de 645 nm).

Os resultados representam uma forte evidência de que o desempenho do sensor não é afetado pelas variações da intensidade de iluminação e pode fornecer medições confiáveis. Isso só reforça as conclusões de estudos que revelam que sensores ativos baseados em reflectância não são afetados pelas condições de iluminação externas (JASPER et al., 2009; KIM et al., 2010; KIPP et al., 2014; KITIC et al., 2019).

2.3.4. Resultado da avaliação da estabilidade das medições de reflectância com o tempo de uso

Na Figura 2.9 são apresentados os resultados dos dados de reflectâncias medidas pelo sensor ReflecSense, de 15 superfícies homogêneas e uniformes ao longo de 12 semanas, para testar o comportamento do ReflecSense nas medições de reflectância. Nesta figura é detalhada a variação das medidas de reflectâncias para os dois melhores resultados de comprimentos de ondas (435 nm e 560 nm) entre os dez avaliados e medidos pelo respectivo ReflecSense. Informações adicionais

relacionadas aos resultados dos demais oitos comprimentos de onda estão disponíveis no Apêndice 1.

O RMSE das medidas de reflectância feitas pelo ReflecSense nas 15 superfícies ao longo de 12 semanas de coletas de dados, para cada um dos dez comprimentos de onda avaliados, é apresentado na Tabela 2.3.

Figura 2.9. Variação, ao longo de 12 semanas, das medidas de reflectâncias feitas pelo sensor ReflecSense de 15 superfícies homogêneas e uniformes de dois comprimentos de onda.

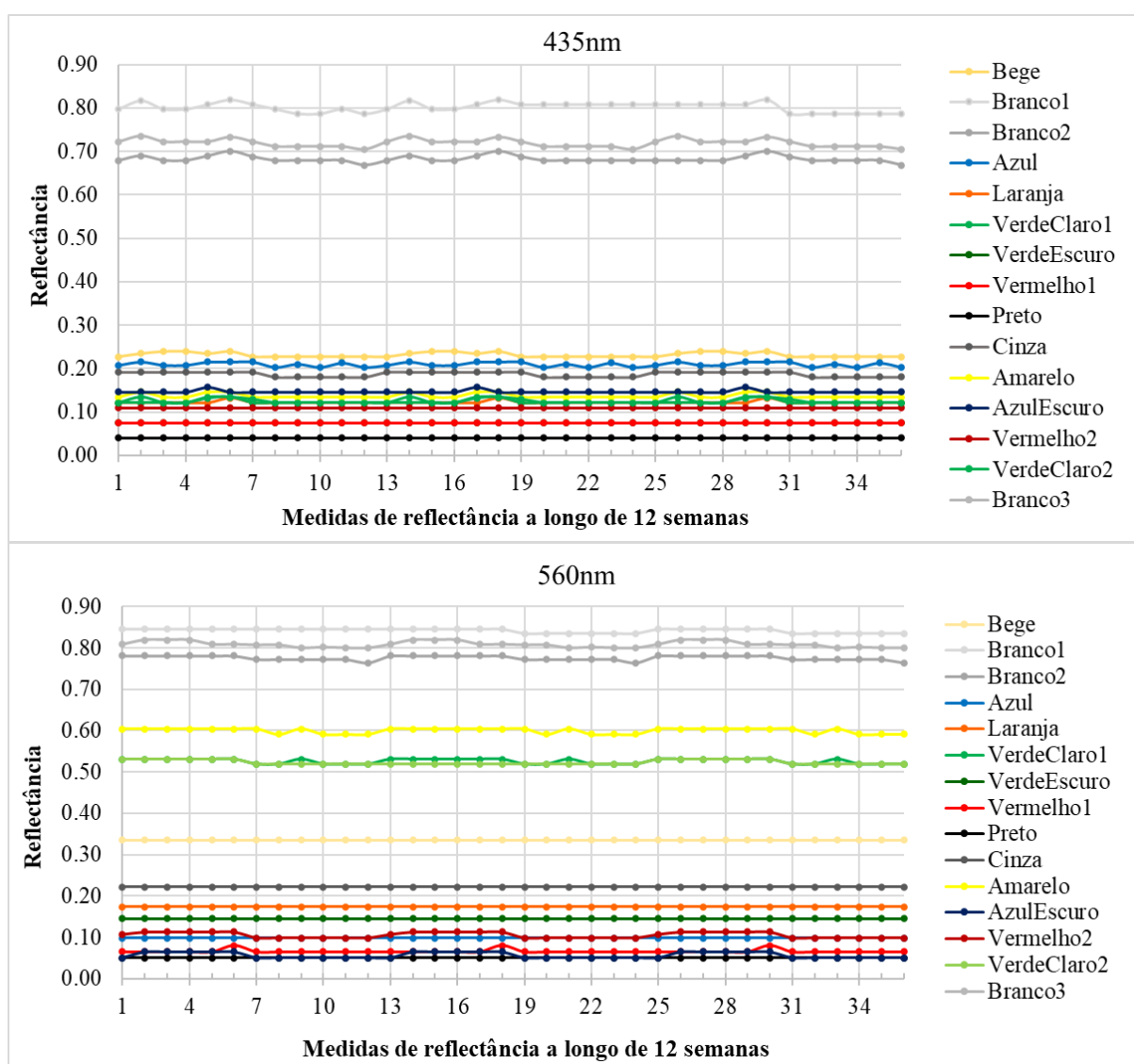


Tabela 2.3. Resultados do indicador Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) na determinação de reflectância pelo ReflectSense ao longo de 12 semanas, para os dez comprimentos de onda, em 15 superfícies

Comprimento de onda (nm)	435	460	535	560	645	680	705	730	810	860
Média	0,06	0,07	0,08	0,05	0,04	0,07	0,06	0,06	0,03	0,06
RMSE Máximo	0,08	0,09	0,09	0,06	0,05	0,08	0,08	0,09	0,05	0,09
Mínimo	0,04	0,06	0,06	0,03	0,02	0,05	0,05	0,05	0,01	0,04

Os resultados apresentados na Tabela 2.3 mostram que os erros RMSE na determinação da reflectância, para a maioria das bandas espectrais avaliadas, foram altos, erros máximos entre 0,05 e 0,09. A possível explicação está no material PVC usado na confecção das superfícies mensuradas. Esse material pode ter favorecido o surgimento de mais ruídos nos fotodiodos do dispositivo AS7265X no ReflectSense, o que prejudicou as medidas de reflectâncias. O fabricante do dispositivo AS7265X declara que ele tem um erro de $\pm 12\%$. Toda a construção do ReflectSense foi pensada de modo a minimizar ao máximo os erros oriundos do AS7265X, mas como é uma característica interna do dispositivo AS7265X, parte dos erros repercutem nas medidas de reflectâncias feitas pelo ReflectSense. Um fato interessante é que nas superfícies naturais avaliadas no item 2.3.2 os erros foram baixos na maioria dos comprimentos de onda, o que sugere que para folhas e solos os ruídos tendem a ser mínimos.

Os erros RMSE médios, máximos e mínimos apresentaram valores próximos. Isso pode ser um indício de que as medições de reflectância, ao longo das 12 semanas, sofreram poucas variações e estas foram uniformes ao longo da coleta de dados. Uma forma visual e intuitiva de observar esta pouca variação foi apresentada na Figura 2.9. Nota-se que a tendência das linhas foi a mesma, ou seja, manteve-se no mesmo patamar, para cada uma das quinze superfícies em cada um dos dois comprimentos de onda (os demais no Apêndice1). As variações de reflectância foram pequenas, decorrentes de ruídos e erros.

Para cada um dos dez comprimentos de onda medidos, em cada uma das 15 superfícies, o valor da média, mediana e moda dos dados de reflectância medidos ao longo de 12 semanas ou foi igual ou então se diferenciou no máximo 0,01 unidade. Esse resultado mostra que as variações foram desprezíveis ao longo de 12 semanas

(Figura 2.9). Somando esse resultado ao discutido acima, sugere-se que o sensor ReflecSense tende a se manter estável e preciso ao longo do tempo de uso.

2.4. CONCLUSÕES

O sensor óptico ativo portátil multiespectral, o ReflecSense, mostrou-se um potencial para as medições de reflectâncias em laboratório. É capaz de medir de forma precisa, menor $r = 0,9731$, e com exatidão, RMSE médio de 0,06, a reflectância de dez comprimentos de onda do espectro eletromagnético, sendo estas: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810 e 860 nm. Os testes mostraram sua potencialidade em medir reflectâncias em plantas e em solos.

Tem ampla resolução espectral frente aos sensores multiespectrais portáteis comerciais, sendo que alguns destes sensores são limitados ao índice de vegetação gerado e sem acesso aos dados de reflectância.

O sensor ReflecSense provou ser ativo, capaz de realizar medições de reflectância de superfícies independentemente da variação da iluminação no ambiente de laboratório.

O estudo apresentado confirmou que o sensor ReflecSense apresenta estabilidade de medições de reflectância por doze semanas. Apresentou algumas pequenas variações, porém essas não foram prejudiciais para o uso no período analisado.

2.5. REFERÊNCIAS

ASAARI, M.S.M.; MISHRA, P.; MERTENS, S.; DHONDT, S.; INZÉ, D.; WUYTS, N.; SCHEUNDERS, P. Close-range hyperspectral image analysis for the early detection of stress responses in individual plants in a high-throughput phenotyping platform. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.138, p.121-138, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.003>

ADAMCHUK, V.I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M.T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.44, n.1, p. 71-91, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>

BEAGLEBOARD. BeagleBone Black Disponível em: <<https://beagleboard.org/black>>. Acesso em: 01 de abril de 2020.

CAO, Q.; MIAO, Y.; WANG, H.; SHANYUHUANG, S.; SHANSHANCHENG, S.; KHOSLA, R.; JIANG, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, v.154, p.133-144, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.005>

FIELDSPEC. ASD HandHeld 2: Hand-held VNIR Spectroradiometer. Disponível em: <<https://www.malvernpanalytical.com/en/support/product-support/asd-range/fieldspec-range/handheld-2-hand-held-vnir-spectroradiometer>>. Acesso em: 01 de abril 2020.

GAO, B.C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, v.58, n.3, p.257-266, 1996.

MUÑOZ-HUERTA, R.F.; GUEVARA-GONZALEZ, R.G.; CONTRERAS-MEDINA, L.M.; TORRES-PACHECO, I.; PRADO-OLIVAREZ, J.; OCAMPO-VELAZQUEZ, R.V. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances. **Sensors**, v.13, n.8, p.10823-10843, 2013. <https://doi.org/10.3390/s130810823>

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. **Precision Agriculture 09: Papers from the 7th European Conference on Precision Agriculture**, Wageningen, p.23-30, 2009.

KIM, Y.; GLENN, D.M.; PARK, J.; NGUGI, H.K.; LEHMAN, B.L. Active spectral sensor evaluation under varying condition. **ASABE**, v.55, p.293-301, 2010. <https://doi.org/10.13031/2013.29813>

KIPP, S.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity Comput. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.100, p.24-33, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.007>

KITIC, G.; TAGARAKIS, A.; CEELYUSZKA, N.; PANIĆ, M.; BIRGERMAJER, S.; SAKULSKI, D.; MATOVIĆ, J. A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.162, p.300-308, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.021>

MAYRINK, G.O., VALENTE, D.S.M., QUEIROZ, D.M. PINTO, F.AC.; TEÓFILO, R.F. Determination of chemical soil properties using diffuse reflectance and ion-exchange resins. **Precision Agriculture**, v. 20, p. 541-561, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9597-y>

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p.1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MINOLTA. 1989. **Chlorophyll meter SPAD-502. Instruction manual**. Minolta Co., Osaka, Japan. 22p., 1989.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, **Proceedings**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v.1, p.309-317, 1973.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2019.

SÁENZ, N.A.; PAEZ, D.E.; ARANGO, C. Local algorithm for monitoring total suspended sediments in micro-watersheds using drones and remote sensing applications. Case study: Teusacá River, La Calera, Colombia. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-1/W4, p.159-165, 2015. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-159-2015>

SCHIRRMANN, M.; GEBBERS, R.; KRAMER, E. Performance of Automated Near-Infrared Reflectance Spectrometry for Continuous in Situ Mapping of Soil Fertility at Field Scale. **Vadose Zone Journal**, v.12, n.4, 14p, 2013. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0199>

SOLIE, J. B.; MONROE, A.D.; RAUN, W. R.; STONE, M. L. Generalized Algorithm for Variable-Rate Nitrogen Application in Cereal Grains. **Agronomy Journal**, v.104, n.2, p. 378-387, 2012. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0249>

SPARKFUN. AS7265x Smart 18-Channel VIS to NIR Spectral_ID 3-Sensor Chipset with Electronic Shutter. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/3/0/AS7265x_Datasheet.pdf>. Acesso em: 01 de abril de 2020.

VERONEZ, M.R.; KUPSSINSKÜ, L.S.; GUIMARÃES, T.T.; KOSTE, E.C.; SILVA, J.M.; SOUZA, L.V.; OLIVERIO, W.F.M.; JARDIM, R.S.; KOCH, I.É.; SOUZA, J.G.; JUNIOR., L.G.; MAUAD, F.F.; INOCENCIO, L.C.; BORDIN, F. Proposal of a Method to Determine the Correlation between Total Suspended Solids and Dissolved Organic Matter in Water Bodies from Spectral Imaging and Artificial Neural Networks. **Sensors**, v.18, n.1, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18010159>

WANG, L.; DUAN, Y.; ZHANG, L.; WANG, J.; LI, Y.; JIN, J. LeafScope: A Portable High-Resolution Multispectral Imager for In Vivo Imaging Soybean Leaf. **Sensors**, v.20, n.8, p. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20082194>

WU, B.S.; RUFYIKIRI, A.S.; ORSAT, V.; LEFSRUD, M.G. Re-interpreting the photosynthetically action radiation (PAR) curve in plants. **Plant Science**, v.289, 110272, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110272>

CAPÍTULO 3: Avaliação do desempenho de um sensor óptico multiespectral na avaliação da resposta espectral da cultura do milho em campo

3.1. INTRODUÇÃO

Na maioria dos cultivos agrícolas, o nitrogênio (N) é o nutriente de maior influência no desenvolvimento de plantas. Por tal característica, o N é intensamente usado nas lavouras produtivas, visando atingir o máximo potencial produtivo. Entretanto, a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados é baixa, entre 33 e 50% em nível mundial (CRAIN et al., 2012). Devido ao alto custo deste tipo de fertilizante e, por se tratar de uma variável importante no balanço econômico, o aumento da eficiência de uso desse fertilizante promove manutenção da produtividade com menos danos ambientais e, como consequência, redução dos gastos com insumos nitrogenados (CRAIN et al., 2012; FLORENÇA et al., 2016).

A baixa disponibilidade de nitrogênio para culturas, principalmente no início do ciclo, tem impacto negativo no desenvolvimento da planta e na produção de biomassa e, como consequência, menor vigor vegetal e baixa produtividade por área (AMARAL et al., 2015; CAO et al., 2015; MARTINS et al., 2020). Em contraparte, o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados aumenta o impacto ambiental, podendo afetar a qualidade do ar e recursos hídricos, além de poder gerar um custo com mitigação de danos de mais de 60 bilhões de dólares, como ocorrido na Europa (DENT e COCKING, 2017). Logo, determinar a dosagem correta de fertilizantes a ser aplicada é de importância produtiva e ambiental.

A baixa eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados e os danos ambientais desencadeados devem-se a vários fatores, desde as perdas por lixiviação e volatilização no solo até perdas na própria planta. O manejo adequado do solo, com aumento da cobertura vegetal, mostrou-se uma alternativa para redução das perdas por lixiviação e volatilização. No entanto, métodos de adubação tradicionais, com dosagem única, no início do ciclo, podem acarretar perdas de nutrientes (FLORENÇA et al., 2016). Diante desses aspectos, pesquisas têm sido desenvolvidas visando reduzir as perdas e aumentar a eficiência de uso do N pelas plantas.

Estudos apontam que o uso de sensores ópticos, com base na radiância das plantas, para a identificação da necessidade de adubação nitrogenada tem contribuído para o aumento da eficiência de fixação de nitrogênio pelas plantas. É

relatado em literaturas científicas que o uso de sensor óptico espectral, como ferramenta de informação para o manejo, tem possibilitado alcançar eficiência de uso de nitrogênio de 61%, além de possibilitar ganhos de mais de cerca de 15% de eficiência em relação à eficiência antes do manejo com uso desses sensores (CAO et al., 2015; CRAIN et al., 2012; LI et al. 2009).

O Índice Vegetativo de Diferença Normalizada (NDVI) tem alta correlação com o vigor da vegetação. Pesquisas assinalam que a adubação quanto à taxa variada utilizando NDVI para determinar a necessidade de N melhora significativamente a fixação e a eficiência de uso desse nutriente pela planta (KITIC et al., 2019; MARTINS et al., 2020; SOLEI et al., 2012, ROUSE et al., 1973; ZHANG et al., 2020).

Existem diferentes técnicas para monitorar o *status* nutricional da planta, desde o processamento de imagens obtidas por satélites e/ou de imagens de alta resolução espacial e temporal obtidas por câmeras espectrais acopladas a aeronaves remotamente pilotadas (RPA) até o uso de sensores ópticos portáteis proximal. O processamento de imagens se destaca, principalmente, pela amostragem de grandes áreas em curto período de trabalho em campo, porém, exige maior tempo de dedicação no processamento de dados (DENG et al., 2018; HABIBULLAH, et al., 2020; HU et al., 2019). Outro ponto a destacar é o alto custo operacional, seja pela aquisição dos equipamentos e imagens, seja pela necessidade de contratar mão de obra especializada para análise das imagens e realização da prescrição do fertilizante. Além disso, a coleta ideal das imagens para geração de índices de vegetação é no meio dia solar, com céu claro. Deste modo, não se pode coletar imagens do alvo a qualquer momento do dia (ZHANG et al., 2020).

Os sensores ópticos comerciais portáteis são de fácil operação e apresentam resultados da condição nutricional da planta de forma mais imediata e de melhor detalhe, planta a planta, que o processamento de imagens. Os sensores ópticos permitem definir a dosagem de N ao longo do desenvolvimento da cultura de modo a corrigir deficiências e evitar redução de produtividade. No entanto, para estes sensores, quanto maior for sua resolução espectral (*i.e.*, número de bandas), maior é o custo de aquisição e mais complexa a operação, tornando-os de baixa acessibilidade a muitos agricultores, em especial em países em desenvolvimento. E são esses que correspondem, aproximadamente, 70% do uso de adubos nitrogenados para fertilização (CRAIN et al., 2012).

Diante do exposto, fica evidente a importância do uso de sensores espectrais na agricultura, bem como a necessidade de desenvolver sensores de baixo custo que operam em uma faixa mais ampla do espectro em relação aos sensores portáteis comerciais. Entre as diferentes possibilidades de monitorar o status nutricional, estes sensores podem identificar o momento em que o fertilizante deve ser aplicado, com isso, contribuindo para a melhoria da fixação de nitrogênio na lavoura e redução do impacto ambiental ocasionados pelo uso de fertilizantes nitrogenados em excesso.

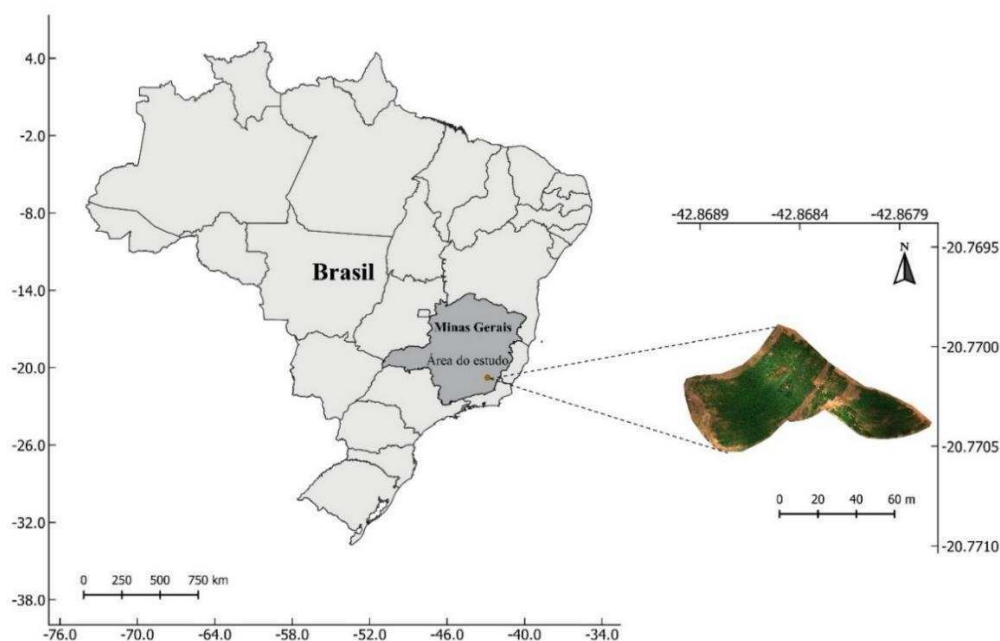
Dentro dessas perspectivas, o objetivo deste capítulo foi avaliar o desempenho do sensor ReflecSense no monitoramento da resposta espectral de NDVI da cultura do milho em tempo real em ambiente de campo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Descrição da área de estudo

O experimento foi conduzido em uma área de 2.700 m², localizada no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil, pertencente à Universidade Federal de Viçosa (UFV) (Figura 3.1). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa. O clima da região de Viçosa, segundo a classificação Köppen adaptada para o Brasil, é do tipo Cwb, definido como tropical de altitude, com verão brando e chuvoso e inverno frio e seco (GOLFARI, 1975; VALVERDE, 1958).

Figura 3.1. Localização geográfica da área experimental de plantio de milho no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil.



A área foi cultivada com milho cultivar híbrido BM 812 PRO2 em regime de sequeiro. Inicialmente, a área foi adubada com NPK 08-28-16 na concentração de 300 kg por hectare. Posteriormente, foi realizada a semeadura em plantio direto na palhada, das sementes de milho cultivar BM 812 PRO2, com razão de semeadura igual a seis sementes por metro e espaçamento de 80 cm entrelinhas, no dia 26 de novembro de 2019.

3.2.2. Especificação técnica dos sensores

Neste estudo foi avaliado o desempenho do ReflecSense em ambiente de campo. Este sensor é um protótipo de baixo custo, com resolução espectral dividida em dez bandas do espectro eletromagnético, com picos em: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810; e 860 nm; e 20 nm de FWHM (*Full Width at Half Maximum*).

O sensor foi desenvolvido no Laboratório de Projeto de Máquinas e Visão Artificial (PROVISAGRO), do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, com registro de Depósito de patente de número BR 10 2020 011013 6 no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPE), Brasil. Informações a respeito do Depósito de patente podem ser encontradas no Apêndice 2.

Para fins de comparação com o ReflecSense, foi utilizada a câmera multiespectral MicaSense RedEdge-MX (MicaSense, Seattle, WA, EUA) e o sensor GreenSeeker (GreenSeeker, Trimble Inc., Sunnyvale, Califórnia, EUA). A RedEdge MX possui cinco sensores CMOS que possibilitam obter informações nas seguintes bandas: 475 (20 FWHM); 560 (20 FWHM); 668 (10 FWHM); 717 (10 FWHM) e 840 nm (40 FWHM). Além disso, esta é capaz de capturar até uma imagem por segundo no formato RAW 12 bits e com um campo de visão de 47,2°, para todas as cinco bandas. Ademais, a RedEdge-MX tem um sensor de luz solar (*downwelling light sensor* -DLS), o qual é usado para ajustar, no momento de captura das imagens, o tempo de exposição para cada um dos sensores CMOS. Neste estudo, as configurações da câmera foram ajustadas para o modo automático e as imagens foram armazenadas em formato TIFF, com resolução radiométrica de 12 bits por banda.

O GreenSeeker é um sensor ativo utilizado amplamente para a medição de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Ele tem resolução espectral dividida em duas bandas, com picos nos comprimentos de onda de 660 nm e 770 nm. Apresenta dois LEDs que emitem radiação a 660 nm e 770 nm para coletar dados de refletância e calcular o NDVI do dossel da cultura, com os valores de NDVI variando entre 0,00 e 0,99 (GREENSEEKER, 2020; KITIC et al., 2019; TREMBLAY et al., 2008).

3.2.3. Obtenção dos dados de campo

3.2.3.1. Coleta de dados com o sensor ReflecSense

O monitoramento da resposta espectral da cultura do milho com o sensor ReflecSense foi realizado em sete datas distintas, correspondentes a diferentes estádios vegetativos da cultura do milho (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Coletas de dados com ReflecSense nos diferentes estágios de crescimento do milho.

Coleta	Data	Estádio de crescimento
1 ^a	04/12/2019	Emergência (VE)
2 ^a	11/12/2019	Uma folha (V1)
3 ^a	18/12/2019	Duas folhas (V2)
4 ^a	23/12/2019	Três folhas (V3)
5 ^a	06/01/2020	Seis folhas (V6)
6 ^a	15/01/2020	Oito folhas (V8)
7 ^a	22/01/2020	Dez folhas (V10)

Em cada data de coleta, um grid irregular com 20 pontos amostrais foi utilizado em um delineamento inteiramente casualizado. Todos os pontos amostrais foram georreferenciados com auxílio de um Receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) topográfico, modelo Trimble ProXT (Trimble Inc., Sunnyvale, Califórnia, EUA). A resposta espectral da cultura foi monitorada por meio do NDVI, calculado pela Equação 3.1, mensurado em cada ponto amostral. Foram realizadas cinco leituras por ponto em uma área circular de 21,5 cm de diâmetro, área amostrada pelo ReflecSense.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (3.1)$$

Em que NDVI é a *Normalized Difference Vegetation Index*; R_{NIR} é a reflectância no comprimento de onda do infravermelho próximo (NIR) e R_{Red} é a reflectância no comprimento de onda do vermelho.

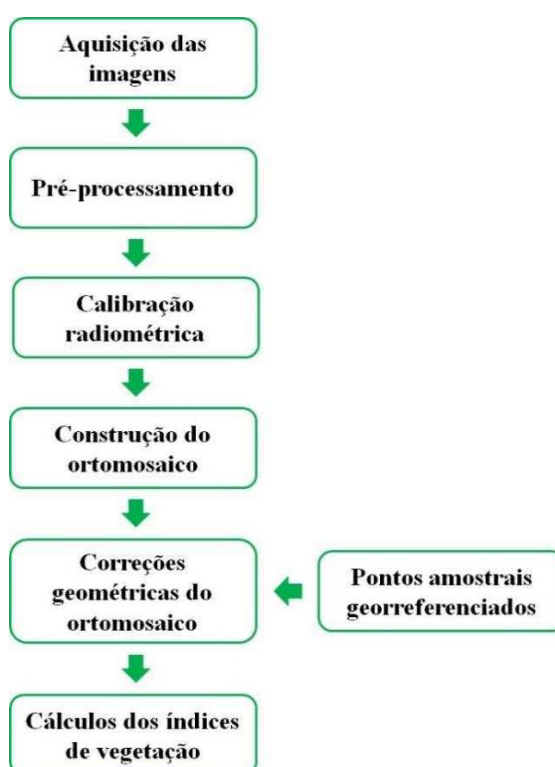
A coleta de dados de NDVI das plantas de milho foi feita com o ReflecSense a uma distância de 27 cm das plantas. Isto é, a base do tronco piramidal em alumínio era o limiar de contato com a folha mais próxima do ReflecSense.

3.2.3.2. Coleta de dados com o sensor MicaSense RedEdge-MX

A aquisição das informações espectrais com o sensor MicaSense RedEdge-MX ocorreu nas mesmas datas em que foram feitas as leituras com o ReflecSense (Tabela 3.1), e o tempo entre essas aquisições foi o menor possível, primeiro a coleta de dados com a MicaSense-MX e, logo após, a coleta com o ReflecSense. A RedEdge-MX foi

acoplada a um a aeronave remotamente pilotada (RPA), DJI Matrice 100 Quadcopter (DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, China). Os voos foram realizados entre 11 e 13 horas sob ausência de nuvens. Para cada voo, o plano de voo foi programado garantindo 75% de sobreposição frontal e lateral na captura das imagens a uma altura de voo de 50 metros. As etapas da coleta de dados e processamento são apresentadas no fluxograma da Figura 3.2.

Figura 3.2. Fluxograma desde a aquisição de imagens até os cálculos do índice de vegetação



Após a aquisição das imagens em nível de campo, estas foram descarregadas em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográfica) para posteriores processamentos. Um ortomosaico foi construído para cada data de coleta. Para a construção dele foi utilizado o software AgisoftTM MetaShape (Version 1.5.3, Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia). Inicialmente foi realizada a calibração radiométrica das imagens. Para tal, foi utilizada a imagem do painel de calibração da câmera (PCC), a qual foi obtida antes da realização dos voos. O PCC oferece informações de calibração associadas às imagens adquiridas no espectro do visível e no

infravermelho próximo. As imagens do PCC foram usadas para converter valores brutos de pixels em refletância no AgisoftTM.

Posteriormente, as imagens foram alinhadas. Nesse processo, a posição precisa de cada imagem individual é determinada, bem como a geração de uma nuvem de pontos tridimensionais. Estes processos são importantes para descrever o relevo da área em estudo. A próxima etapa consistiu na densificação da nuvem de pontos e, ao ser finalizada, foi gerado um Modelo Digital de Superfície, que posteriormente foi usado para a construção do ortomosaico. Ao final do processamento de imagens no programa AgisoftTM, uma ortofoto com resolução espacial de 0,05 m foi exportada em formato GeoTiff e descarregada no software QGIS 3.2.2 (QGIS Development Team, 2019).

No QGIS foi realizada a correção geométrica. Para essa, foram utilizados 4 pontos de controle. Esses foram georreferenciados por meio do GNSS topográfico Trimble ProXT. Após a obtenção da ortofoto georreferenciada, foi obtido o NDVI. Em seguida, foram criadas máscaras por meio de um *buffer* com diâmetro de 21,5 cm em cada um dos 20 pontos amostrais. Por fim, foram obtidas as médias para fins de comparação com o ReflecSense.

3.2.3.3. Coleta de dados com o sensor GreenSeeker

No mesmo grid amostral irregular com 20 pontos amostrais descrito no item 2.3.1. foram coletados os dados de NDVI do dossel do milho pelo sensor GreenSeeker. A resposta espectral da cultura foi coletada com o sensor em uma altura de 60 cm, equivalendo a uma área oval amostral de 25 cm de raio maior.

3.2.3.4. Análise estatística

Os NDVIs obtidos por ambos sensores foram comparados por meio de análise de regressão linear e calculado o Erro Padrão da Estimativa (S), para verificar o comportamento entre sensores. As análises estatísticas foram realizadas por meio de linguagem R no software RStudio, todas com nível de significância de 1% ($p < 0,01$) (R CORE TEAM, 2019).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes ao experimento realizado na área cultivada com milho, na qual foram comparadas as medidas dos NDVIs obtidos pelo ReflecSense com os obtidos pelo GreenSeeker e pela MicaSense-MX, são apresentados na Figura 3.3. A comparação entre o NDVI medido pelo GreenSeeker com o obtido pela câmera MicaSense-MX é apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.3. Comparação entre as medidas de NDVI feitas pelo ReflectoSensor com as do GreenSeeker e MicaSense-MX em experimento de campo em área cultivada com milho.

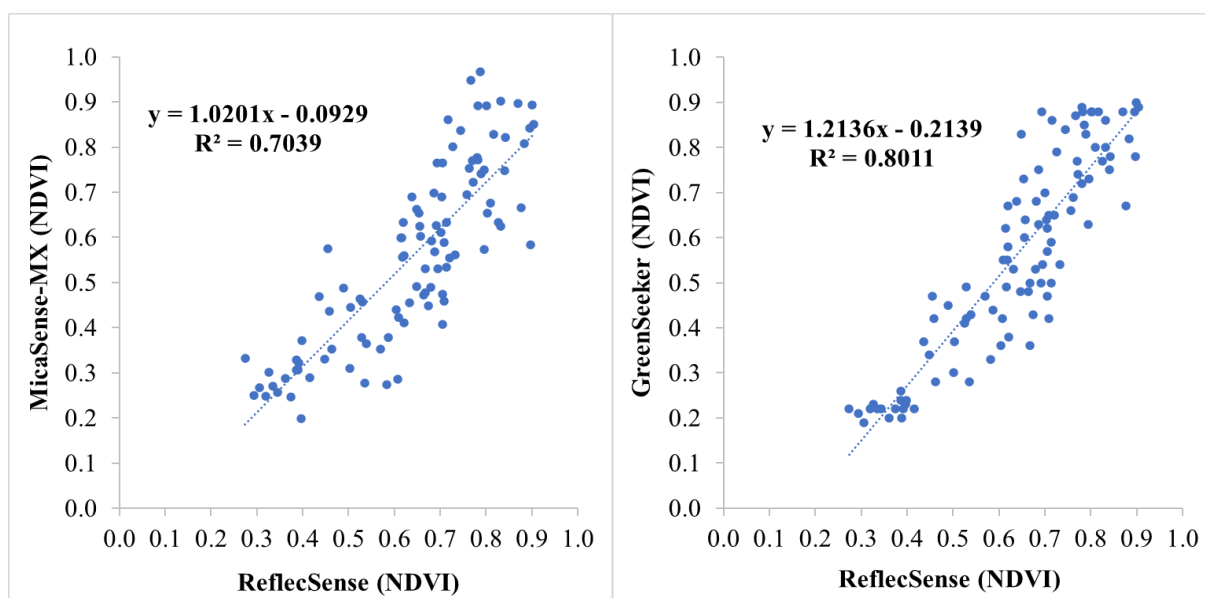
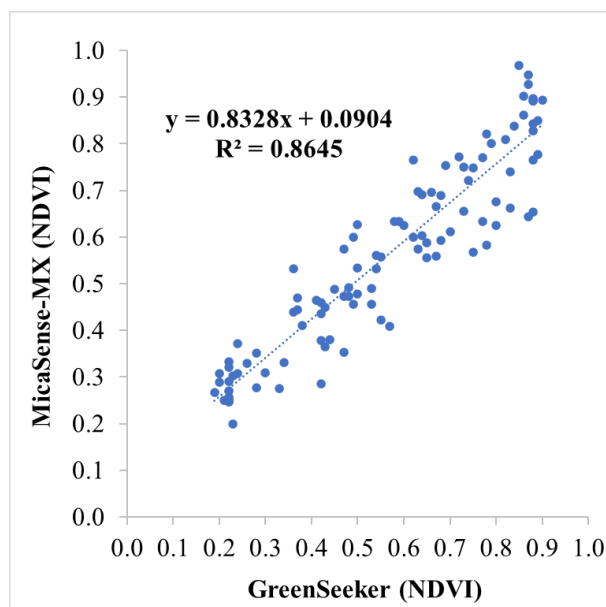


Figura 3.4. Comparação entre as medidas de NDVI feitas pelo GreenSeeker com as do sensor MicaSense-MX em experimento de campo em área cultivada com milho.



Os resultados do experimento de campo, apresentados na Figuras 3.3, mostram a capacidade do sensor ReflecSense em identificar a variabilidade espacial e temporal de NDVI no dossel de um cultivo de milho de forma semelhante ao GreenSeeker e à MicaSense-MX, com $R^2 = 0,8011$ e $0,7039$ respectivamente. Tal capacidade é fundamental para otimizar o uso de fertilizantes nitrogenados por prática de aplicação à taxa variada. Porém os erros na medição de NDVI em comparação com os sensores comerciais são consideráveis. Na comparação com o GreenSeeker o Erro Padrão da Estimativa (S) foi de 0,122 e com a MicaSense-MX o S foi igual a 0,121.

A diferença entre as medidas de NDVI feitas pelo ReflecSense com os sensores comerciais é explicada pela dispersão da reflectância das ondas eletromagnéticas no dossel e pelas diferenças construtivas de cada sensor. Devido às características fenológicas do milho (arquitetura do dossel), a dispersão da reflectância é maior. Cada sensor lida diferente com a dispersão da reflectância, o que resulta em resultados de NDVI distintos. Tal comportamento também foi relatado no sensor de baixo custo desenvolvido por Crain et al. (2012).

Quanto às diferenças construtivas, essas levam a ruídos elétricos diferentes e como consequência medidas diferentes de NDVI. Outro fato é que o NDVI calculado pela MicaSense-MX é obtido pelos comprimentos de onda 668 nm e 840 nm com 10

nm de FWHM. O NDVI medido pelo GreenSeeker é obtido pelos dados dos comprimentos 660 nm e 770 nm. Já o ReflecSense calcula o NDVI usando os comprimentos de onda 680 nm e 860 nm com 20 nm de FWHM. Como consequência, comprimentos de onda distintos levam a medidas de NDVI distintas. Apesar dos diferentes comprimentos de onda usados por cada sensor, o comportamento das medidas de NDVI foi semelhante entre os três sensores.

A regressão linear comparando as medidas de NDVI do GreenSeeker com a MicaSense-MX obteve $S = 0,081$ (Figura 3.4). Tanto o ReflecSense quanto o GreenSeeker apresentam o Erro Padrão da Estimativa de NDVI, com relação ao NDVI da MicaSense-MX, próximos, o que leva a inferir a capacidade do ReflecSense apresentar estimativas de NDVI, em comparação com a MicaSense-MX, semelhantes às estimativas feitas pelo GreenSeeker. Este difere por apresentar uma menor dispersão dos dados em comparação com os dados do ReflecSense, porém o comportamento de ambos é semelhante.

A pesquisa desenvolvida por Zhang et al. (2020) em uma área cultivada de colza comparou o NDVI medido pelo GreenSeeker com o NDVI estimado pelas bandas 670 nm e 850 nm da câmera Nikon D7000 modificada e o NDVI estimado pelas bandas 668 nm e 840 nm de uma câmera MicaSense RedEdge 3. Para a câmera modificada a relação entre os sensores obteve $R^2 0,68$, já para a MicaSense 3, a relação com as medidas do GreenSeeker obteve $R^2 0,87$. Esses resultados atingem nível de associação entre câmeras e GreenSeeker semelhante ao apresentado neste estudo. Isso fortalece os resultados do estudo aqui apresentados.

Sensores espectrais desenvolvidos nos estudos realizados por Kitic et al. (2019) e Crain et al. (2012) alcançaram resultados semelhantes aos conseguidos pelo ReflecSense. Em experimento de campo com milho, Kitic et al. (2019) alcançaram R^2 de 0,886 entre a comparação dos valores de NDVI medidos pelo sensor espectral desenvolvido por eles (Plant-O-Meter) e o sensor GreenSeeker. Seu estudo não apresentou o Erro Padrão da Estimativa. Por outro lado, Crain et al. (2012) obtiveram R^2 de 0,9138 e $S = 0,05$ na comparação dos valores de NDVI medidos pelo sensor GreenSeeker com o sensor desenvolvido por eles, também em experimento com milho. O sensor desenvolvido por Crain et al. (2012) foi calibrado diretamente pelo sensor GreenSeeker, o que favorece a tendência de adequação do modelo.

Os resultados apresentados sugerem que o sensor ReflecSense apresenta potencial para ser usado em condição de campo, podendo ser usado, por exemplo, em aplicações de taxa variável de fertilizante. Ele tem comportamento de medições de NDVI semelhante ao GreenSeeker e à MicaSense-MX em condições reais de campo.

3.4. CONCLUSÕES

O protótipo de sensor óptico ativo portátil multiespectral, ReflecSense de construção eletrônica simples, mostrou potencial para medições do NDVI em nível de campo. Os resultados mostraram capacidade de identificar a variabilidade espacial do NDVI.

O ReflecSense foi capaz de avaliar a condição das plantas em tempo real, diferenciando um maior vigor vegetal de um menor, tomando como referência a variação do NDVI.

O estudo mostrou a capacidade do ReflecSense em medir NDVI, em ambiente de campo, semelhante ao GreenSeeker, $R^2 = 0,8011$, e à câmera MicaSense-MX, $R^2 0,7039$.

3.5. REFERÊNCIAS

AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F. B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v.16, n.1, p.15-28, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9377-2>

CAO, Q.; MIAO, Y.; FENG, G.; GAO, X.; LI, F.; LIU, B.; YUE, S.; CHENG, S.; USTIN, S.L.; KHOSLA, R. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 112, p. 54-67. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.012>

CRAIN, J.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; RAUN, B. Evaluation of a Reduced Cost Active NDVI Sensor for Crop Nutrient Management. **Journal of Sensors**, v.2012, 10p., 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/582028>

DENG, L.; HAO, X.; MAO, Z.; YAN, Y.; SUN, J.; ZHANG, A. A Subband Radiometric Calibration Method for UAV-Based Multispectral Remote Sensing. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n.8, p.2869-2880, 2018. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2842466>

DENT, D.; COCKING, E. Establishing symbiotic nitrogen fixation in cereals and other non-legume crops: The Greener Nitrogen Revolution. **Agriculture & Food Security**, v.6, n.7, 9p., 2017. <https://doi.org/10.1186/s40066-016-0084-2>

FLORENÇA, M.; CROOK, M.B.; GARCIA, K.; COSTAS, A.G.; GEDDES, B.R.; KOURI, E.D.; PARAMASIVAN, P.; RYU, M.; OLDROYD, G.E.; POOLE, P.S.; UDVARDI, M.K.; VOIGT, C.A. ANÉ, J.; PETERS, J.W. Symbiotic Nitrogen Fixation and the Challenges to Its Extension to Nonlegumes. **Applied and Environmental Microbiology**, v.82, n.13, p.3698-3710, 2016. <https://doi.org/10.1128/AEM.01055-16>

GREENSEEKER. GreenSeeker Handheld Crop Sensor. Disponível em: <<https://agriculture.trimble.com/product/greenseeker-handheld-crop-sensor/>>. Acesso em: 08 de abril 2020.

GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1975. 65 p.

HABIBULLAH, M.; MOHEBIAN, M.R.; SOOLANAYAKANAHALLY, R.; WAHID, K.A.; DINH, A. A Cost-Effective and Portable Optical Sensor System to Estimate Leaf Nitrogen and Water Contents in Crops. **Sensors**, v.20, n.5, p.1-16, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20051449>

HU, J.; PENG, J.; ZHOU, Y.; XU, D.; ZHAO, R.; JIANG, Q.; FU, T.; WANG, F.; SHI, Z. Quantitative Estimation of Soil Salinity Using UAV-Borne Hyperspectral and Satellite Multispectral Images. **Remote Sensing**, v.11, n.7, p.736-751, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11070736>

KITIC, G.; TAGARAKIS, A.; CESELYUSZKA, N.; PANIĆ, M.; BIRGERMAJER, S.; SAKULSKI, D.; MATOVIĆ, J. A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.162, p.300-308, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.021>

LI, F.; MIAO, Y.; ZHANG, F.; CUI, Z.; LI, R.; CHEN, X.; ZHANG, H.; SCHRODER, J.; RAUN, W.R.; JIA, L. In-season optical sensing improves nitrogen-use efficiency for winter wheat. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n.5, p.1566-1574, 2009. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0150>

MARTINS, R.N.; PINTO, F.A.C.; MOURA, A.D.; SIQUEIRA, W.C.; VILLAR, F.M.M. Nitrogen variable rate fertilization in corn crop prescribed by optical sensor. **Journal of Plant Nutrition**, v.43, n.11, p.1681-1688, 2020. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1729805>

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium, **Proceedings**, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, v.1, p.309-317, 1973.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2019.

SOLIE, J. B.; MONROE, A.D.; RAUN, W. R.; STONE, M. L. Generalized Algorithm for Variable-Rate Nitrogen Application in Cereal Grains. **Agronomy Journal**, v.104, n.2, p. 378-387, 2012. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0249>

TREMBLAY, N.; WANG, Z.; MA, B-L.; BELEC, C.; VIGNEAULT, P. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. **Precision Agriculture**, v.10, p.145-161, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9080-2>

ZHANG, J.; WANG, C.; YANG, C.; JIANG, Z.; ZHOU, G.; WANG, B.; SHI, Y.; ZHANG, D.; YOU, L.; XIE, J. Evaluation of a UAV-mounted consumer grade camera with different spectral modifications and two handheld spectral sensors for rapeseed growth monitoring: performance and influencing factors. **Precision Agriculture**, v.21, p.1092-1120, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09710-w>

CAPÍTULO 4: Conclusão geral

Cenário geral

O Brasil tem um vasto potencial agropecuário para o uso de sensores portáteis espectrais, sobretudo, graças aos benefícios que eles podem promover na produção. Porém, o barateamento do custo de aquisição de tecnologias espectrais é um ponto relevante a ser considerado para sua adoção.

Medições de reflectâncias em laboratório

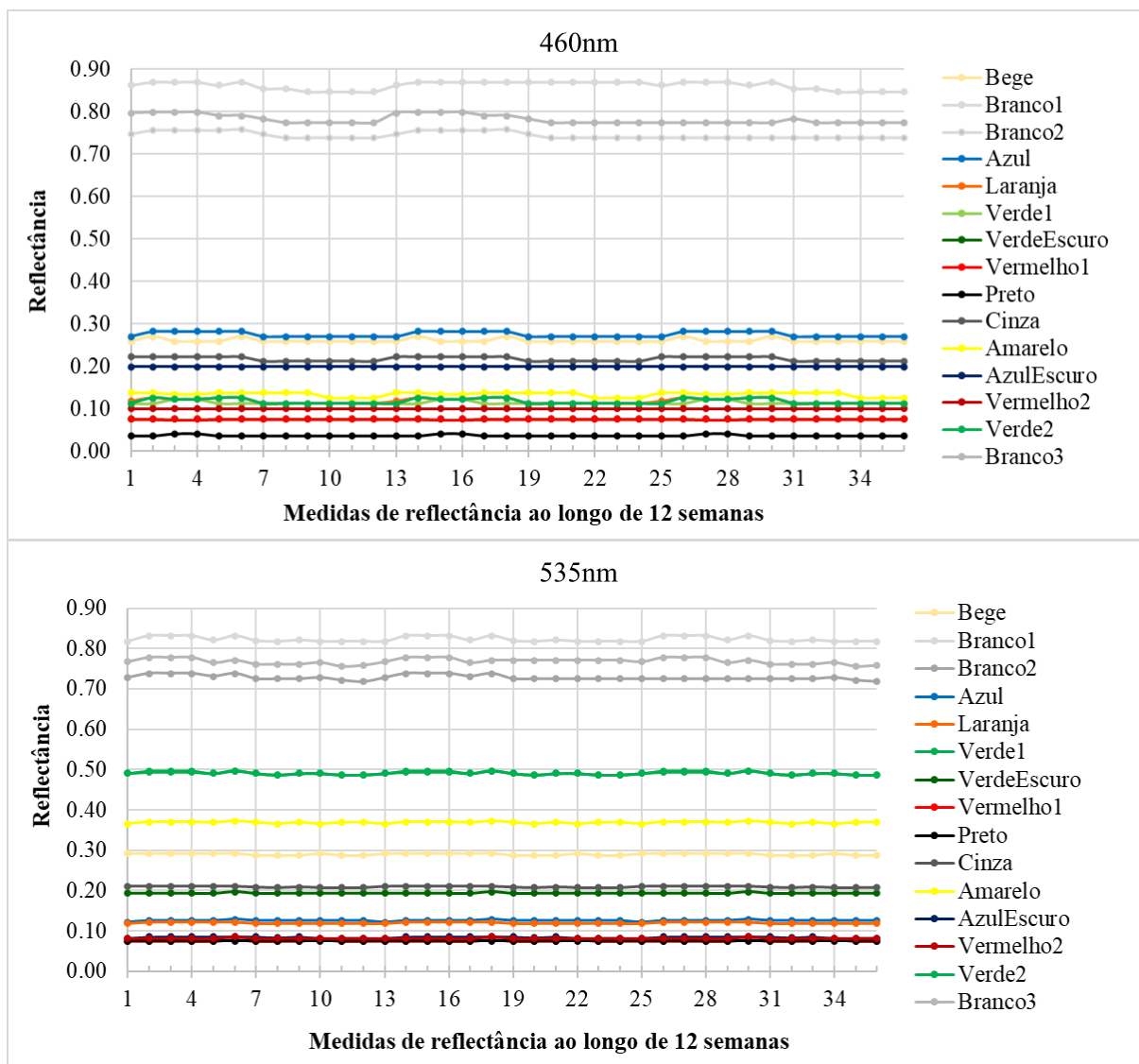
O ReflecSense se mostrou capaz de medir com ótima precisão, desvio padrão máximo de 0,01, as reflectâncias de dez bandas espectrais de alvos sintéticos e naturais, como destaque para este último. Com as reflectâncias de dez bandas espectrais é possível ter parte da assinatura espectral de alvos.

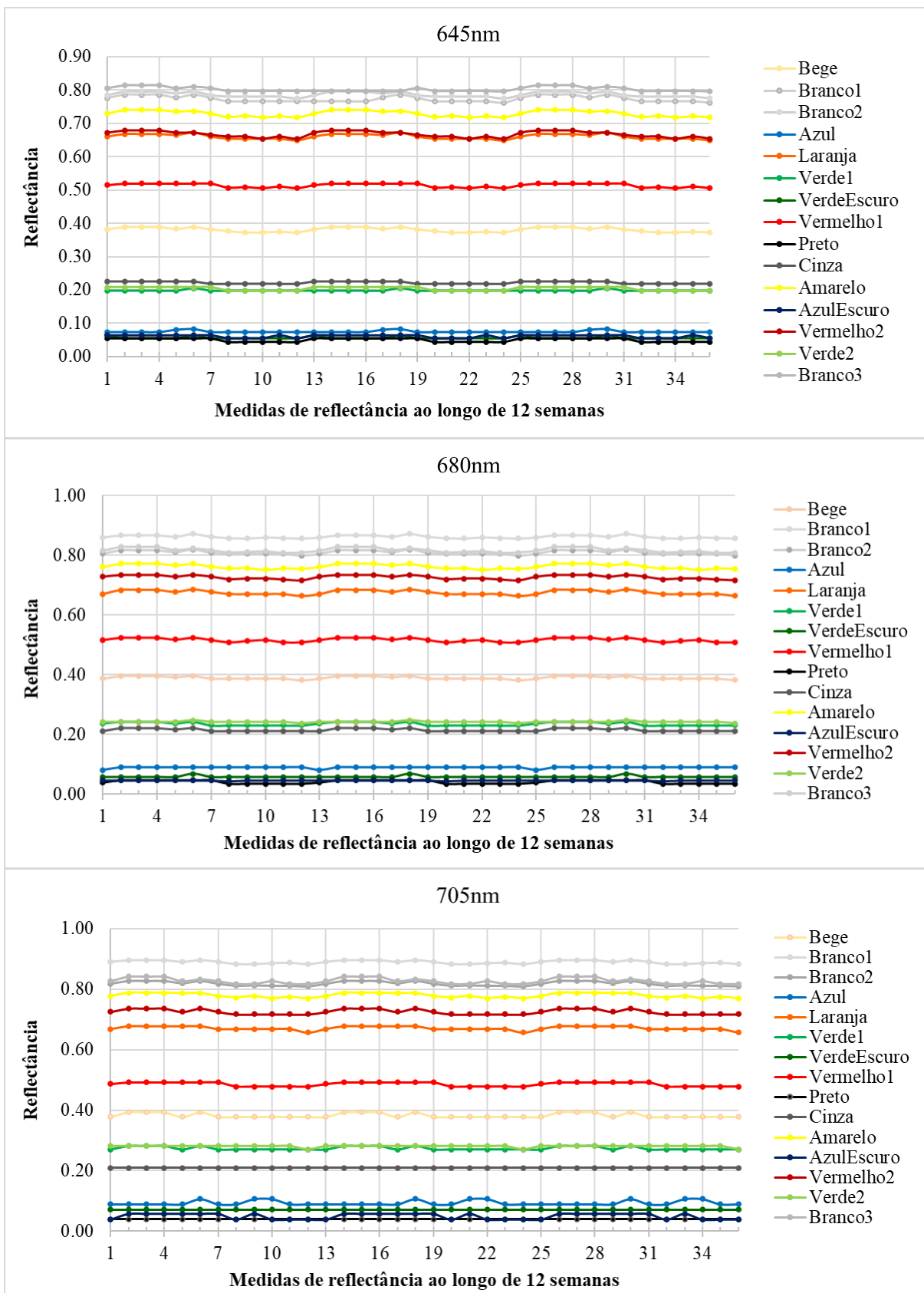
Medições de NDVI em ambiente de campo

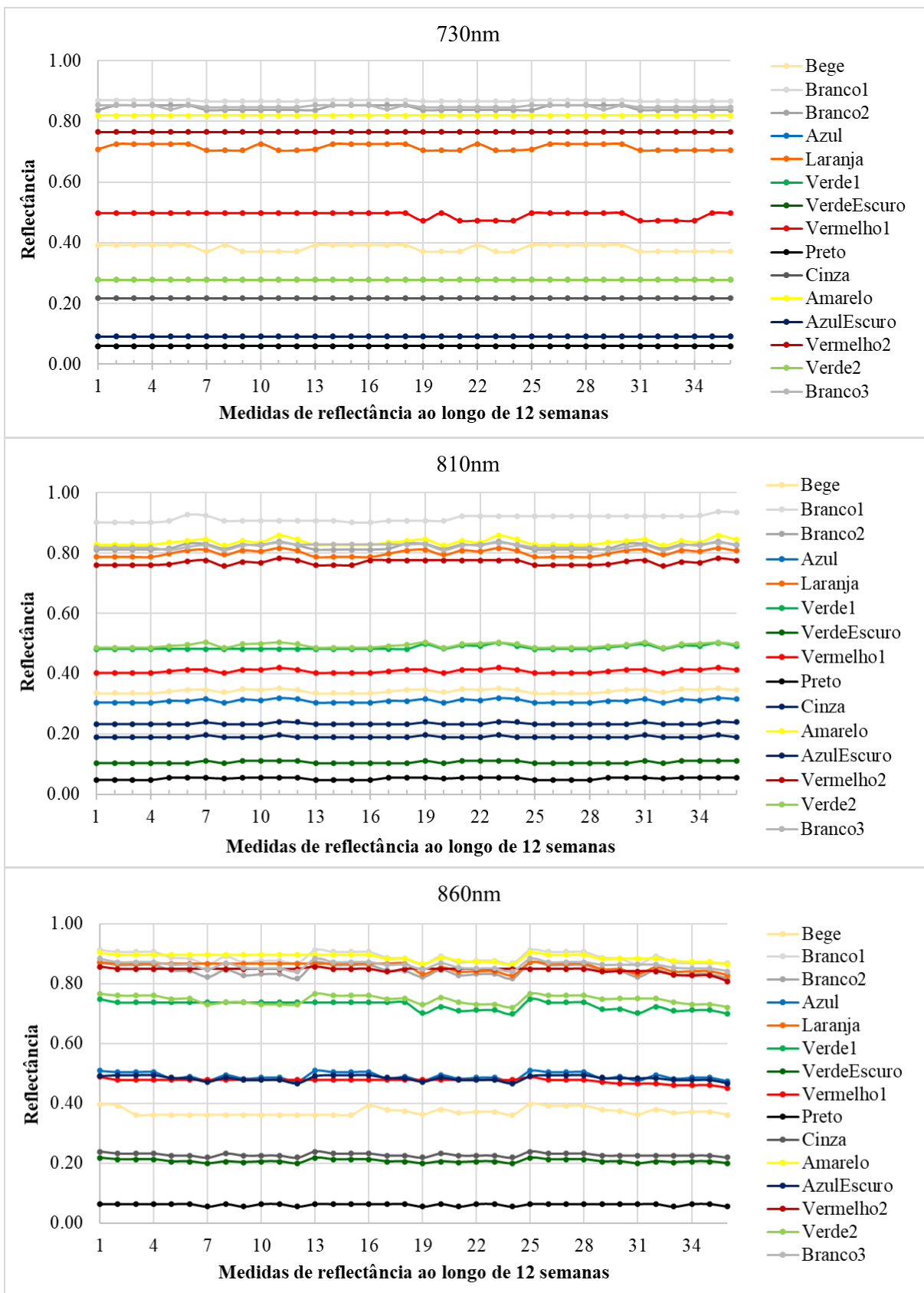
Em ambiente de campo, o comportamento do ReflecSense na medição de NDVI foi satisfatório, apresentando valores similares aos obtidos por sensores comerciais. Além disso, ressalta-se a sua simplicidade construtiva. Porém, há a necessidade de melhorias na exatidão das medidas e pesquisas futuras podem vir a contribuir para o aprimoramento dessa tecnologia.

APÊNDICES

APÊNDICE 1. Variação, ao longo de 12 semanas, das medidas de reflectância feitas pelo sensor ReflecSense de 15 superfícies homogêneas e uniformes, para oito comprimentos de onda medidos pelo mesmo sensor.







APÊNDICE 2. Depósito de pedido de patente número BR 10 2020 011013 6

01/06/2020 870200067855
11:50

29409161917184572

Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2020 011013 6

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 25944455000196

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Campus UFV, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação, sala 04.

Cidade: Vicos

Estado: MG

CEP: 36570-900

País: Brasil

Telefone: (31) 3612 2334

Fax:

Email: propriedadeintelectual@ufv.br

**PETICIONAMENTO
ELETRÔNICO**

Esta solicitação foi enviada pelo sistema Peticionamento Eletrônico em 01/06/2020 às 11:50, Petição 870200067855

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL PARA A MEDIDA DE REFLECTÂNCIAS E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Resumo: O presente pedido de patente refere-se a um dispositivo óptico ativo portátil multiespectral capaz de medir a reflectância de dez bandas do espectro eletromagnético com pico em: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810; e 860 nm, ao melhor custo-benefício existente no Brasil e no mundo. Com a invenção é possível calcular inúmeros índices de vegetação com eficiência, rapidez e praticidade das mensurações, sendo aplicada no setor de agricultura de precisão e de espectroscopia em laboratório.

Figura a publicar: 1



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
REITORIA

Campus Universitário - Viçosa, MG - 36570-900 - Tel (31) 3612-1001 - E-mail: reitoria@ufv.br

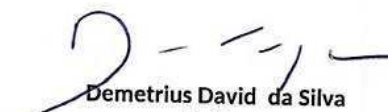
PROCURAÇÃO

OUTORGANTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, pessoa jurídica de direito público, criada pelo Poder Público Federal, na forma de fundação pública de cunho educacional, com sede na Avenida P. H. Rolfs, s/nº, *Campus Universitário*, Viçosa, Minas Gerais, inscrita no CNPJ/MF sob o nº 25.944.455/0001-96, neste ato representada por seu Reitor, Professor Demetrius David da Silva, brasileiro, casado, portador da Carteira de identidade de nº 606795-ES, expedida pela SSP/ES, inscrita no CPF sob o nº 542.934.726-49, com domicílio legal na Universidade Federal de Viçosa, localizada a Avenida P. H. Rolfs, s/nº, *Campus Universitário*, Viçosa, Minas Gerais, CEP 36570-900;

OUTORGADA: MARIA CATARINA MEGUMI KASUYA, brasileira, casada, professora universitária, portadora da Carteira de identidade nº 1.952.996, expedida pela SSP/PR, inscrita no CPF sob o nº 332.978.436-91, com domicílio legal na Universidade Federal de Viçosa, localizada a Avenida P. H. Rolfs, s/nº, *Campus Universitário*, Viçosa, Minas Gerais, CEP 36570-900;

PODERES: A OUTORGANTE confere ao **OUTORGADO** os poderes contidos na cláusula "AD NEGOTIA", objetivando representar a Universidade Federal de Viçosa junto ao **INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL - INPI**, com poderes amplos e gerais, podendo o **OUTORGADO**: assinar formulários e termos de autorização para cópia, promover, perante autoridade competente, prova ou contraprova pertinentes à titularidade de direitos de propriedade industrial e, ainda, tudo o mais que se fizer necessário para o bom e fiel cumprimento do presente mandato, podendo substabelecer, no todo ou em parte, a presente procuração, que terá a validade de 3 (três) anos.

Viçosa, 06 de fevereiro de 2020.


Demetrius David da Silva
Reitor



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
REITORIA

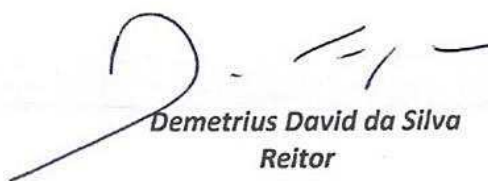
Campus Universitário – Viçosa, MG – 36570-900 – Tel (31) 3612-1004 – E-mail: reitoria@ufv.br

PORTARIA Nº 1.228/2019, DE 11/10/2019

O Reitor da Universidade Federal de Viçosa, no uso de suas atribuições, conferidas pelo Decreto de 23/05/2019, publicado no Diário Oficial da União de 24/05/2019, resolve

delegar competência à Presidente da Comissão Permanente de Propriedade Intelectual – CPPI da Universidade Federal de Viçosa, MARIA CATARINA MEGUMI KASUYA, matrículas 6228-6/UFV e 0429696-9/Siape, para representar a Instituição junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI, podendo assinar formulários e termos de autorização para cópia; promover, perante autoridade competente, prova ou contraprova concernentes à titularidade de direitos de propriedade industrial; e realizar outras ações pertinentes ao desempenho da presente representação.

Publique-se e cumpra-se.


Demetrius David da Silva
Reitor

Relatório descritivo

DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL PARA A MEDIDA DE REFLECTÂNCIAS E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

CAMPO TÉCNICO DA INVENÇÃO

01. O presente pedido de patente refere-se a um dispositivo óptico ativo portátil multiespectral capaz de medir a reflectância de dez bandas do espectro eletromagnético com pico em: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810 e 860 nm, ao melhor custo-benefício existente no Brasil e no mundo. Com a invenção é possível calcular inúmeros índices de vegetação com eficiência, rapidez e praticidade das mensurações.

02. O objetivo da presente invenção é a criação de um sensor óptico multiespectral portátil ativo de baixo custo e melhor custo-benefício, que promova a acessibilidade de utilização e a produção por empresas fabricantes de dispositivos ópticos para medição de reflectâncias em ambientes de laboratório e de campo.

ESTADO DA TÉCNICA

03. A reflectância de uma superfície refere-se à razão entre a quantidade de radiação refletida sobre esta superfície e a quantidade incidida da mesma radiação em vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Cada superfície apresenta um padrão definido de reflectância nos diferentes comprimentos de onda, de modo que qualquer modificação desde padrão indica modificações na superfície e no objeto ou ser vivo que a possui.

04. As modificações dos padrões de reflectâncias de uma dada superfície em um dado espaço de tempo contêm uma informação do objeto ou ser vivo. Essa informação é mais bem compreendida de maneira mais intuitiva como índices de vegetação, que representam uma relação matemática da reflectância da superfície em dois ou mais comprimentos de onda do espectro.

05. Por meio da assinatura espectral de uma superfície, radiação refletida em função do comprimento de onda, é possível identificar padrões de aspectos químicos

e biológicos dela e comportamento normal ou atípico, caso a superfície seja um ser vivo. Para se ter uma ideia, uma planta saudável, tem sua assinatura espectral bem característica com picos de reflectância no comprimento de onda de 550 nm (cor verde) e de 850 nm (infravermelho próximo), porém baixa reflectância nos comprimentos de 450 nm (cor azul) e de 650 nm (cor vermelha). Deste modo, modificação deste padrão de reflectâncias nas plantas pode indicar baixa taxa fotossintética e estresse.

06. Nos solos a reflectância de ondas eletromagnéticas é afetada pela quantidade de íons, umidade e matéria orgânica presente. Essa característica permite, a partir da assinatura espectral do solo, identificar macronutrientes, micronutrientes e teor de matéria orgânica, especialmente ao observar as reflectâncias na banda do espectro visível e infravermelho próximo.

07. Na agricultura irrigada e no tratamento de água, a concentração de sólidos em suspensão em corpos hídricos é um problema. Na irrigação provoca maior manutenção do sistema de filtração e o entupimento de aspersores, já para o tratamento de água, o aumento do custo desse. Desta forma, quantificar os sólidos em suspensão em água é fundamental para direcionar um melhor manejo dos recursos hídricos.

08. Modelos de predição fundamentado em reflectâncias na banda do infravermelho próximo e do espectro do visível apresentaram resultados satisfatórios na quantificação de sólidos em suspensão em corpos hídricos, de acordo com literaturas científicas. Como exemplo, Veroneze colaboradores (VERONEZ, M.R.; KUPSSINSKÜ, L.S.; GUIMARÃES, T.T.; KOSTE, E.C.; SILVA, J.M.; SOUZA, L.V.; OLIVERIO, W.F.M.; JARDIM, R.S.; KOCH, I.É.; SOUZA, J.G.; JUNIOR., L.G.; MAUAD, F.F.; INOCENCIO, L.C.; BORDIN, F. Proposal of a Method to Determine the Correlation between Total Suspended Solids and Dissolved Organic Matter in Water Bodies from Spectral Imaging and Artificial Neural Networks. *Sensors*, v.18, n.1, 2018) desenvolveram um modelo de predição dos sólidos em suspensão relacionado ao Índice de Vegetação com Diferença Normalizada (NDVI) e ao Índice de Água com Diferença Normalizada (NDWI).

09. Há disponíveis no mercado sensores óptico espectrais, tais como o SPAD-502 meter, GreenSeeker, N-Sensor e Crop Circle. O SPAD-502 meter é um clorofilômetro ativo que utiliza a transmitância da banda do espectro da cor vermelha para medir o

Índice SPAD. O N-Sensor mede a reflectância das ondas de comprimento do Red-Edge (730 nm) e infravermelho próximo (760 nm), calculando o Índice Yara. O GreenSeeker é um sensor ativo que utiliza a reflectância nos comprimentos de onda do vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (770 nm) da superfície para calcular o NDVI. Já o Crop Circle faz a medida da reflectância de seis bandas espectrais que cobrem o azul (450 nm), o verde (550 nm), o vermelho (650 nm e 670 nm), o Red-Edge (730 nm), e infravermelho próximo (>760 nm). Apesar de medir seis bandas, o Crop Circle apresenta muitas partes móveis o que prejudica a portabilidade.

10. Quanto maior o número de bandas espectrais cujas reflectâncias são medidas por um mesmo sensor, mais informações da assinatura espectral da superfície são coletadas e como consequência, maiores são os números de índices de vegetação gerados e informações obtidas. Diante do apresentado, a invenção do presente pedido de patente tem melhores vantagens, pois mede dez bandas do espectro eletromagnético e apresenta uma única parte móvel, favorecendo a portabilidade.

11. Um problema relacionado ao acesso a tecnologias, principalmente em países em desenvolvimento, é o custo de aquisição. O sensor Crop Circle, por exemplo, tem custo acima de 30 mil reais, o SPAD-502 meter é superior a 15 mil reais, já o GreenSeeker tem custo maior que 4 mil reais. O custo de aquisição é uma variável relevante, no que toca ao desenvolvimento científico, social e de acessibilidade.

12. A presente invenção é um sensor óptico portátil multiespectral ativo, ou seja, mede na ausência de iluminação, que tem a capacidade de medir a reflectância de dez bandas do espectro eletromagnético com pico de comprimento de onda em: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810 e 860 nm. Não existe no mercado um sensor óptico ativo portátil com esta capacidade. A medição de um maior número de bandas espectrais proporciona maior obtenção de informações da assinatura espectral do alvo, e consequentemente melhor entendimento das características associadas a ele. Seu custo de produção é inferior a 2 mil reais, o que o torna um excelente custo-benefício, haja vista suas características.

13. Em busca realizada nos Bancos de Patentes Nacional e Internacionais, foram encontrados alguns documentos que se referem a sensores ópticos. Os documentos de patentes (US5296702; US5389781; US5585626) descrevem diferentes processos de medição de reflectâncias. Diferentemente, o pedido atual é capaz de medir as reflectâncias de dez bandas do espectro eletromagnético de forma diferente e simples.

DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

14. Figura 1: Imagem em perspectiva do dispositivo óptico portátil multiespectral ativo.
15. Figura 2: Imagem do circuito eletrônico do dispositivo óptico portátil multiespectral ativo.
16. Figura 3: Assinatura espectral de treze padrões de cores.
17. Figura 4: Resultado gráfico da análise de regressão entre o espectrorradiômetro com o dispositivo óptico ativo portátil multiespectral.
18. Figura 5: Comparação do efeito da iluminação sobre as medidas de reflectâncias feitas pelo dispositivo óptico ativo portátil multiespectral.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

19. Para melhor compreensão da tecnologia, objeto do atual pedido de patente, a seguir essa é descrita detalhadamente.
20. O dispositivo óptico ativo portátil multiespectral é apresentado na Figura 1. Ele é constituído externamente por uma estrutura de alumínio na forma de um tronco piramidal de 4 a 8 faces com inclinação entre 10 e 30° (ângulo de abertura entre 20 e 60°) em relação à reta perpendicular ao plano visado. O tronco é conectado por meio de parafusos a uma capa plástica, que tem como função acomodar e proteger o circuito eletrônico responsável pela coleta de dados externos e processamento destes. A estrutura de alumínio é responsável por limitar a área de iluminação e visada do dispositivo multiespectral, de modo a formar uma área plana quadrada de lado 21,47 a 43,31 cm ou octogonal de 9,12 a 17,94 cm de lado, a uma distância de 27 cm entre o dispositivo multiespectral e a superfície alvo.
21. Na Figura 2 é apresentado o circuito eletrônico. Esse circuito é composto por um Computador de Placa Única (CPU) conectado a um sistema de iluminação LED, a um sensor AS7265X, a um sensor VL63L1X, a um LCD 5110, a um regulador de tensão e a baterias. O dispositivo óptico multiespectral usa duas baterias. Uma bateria de 7,4 a 11,1 V de 5000 a 20000 mAh para alimentar o CPU, os sensores e o LCD; e outra bateria de 7,4 a 11,1 V de 2200 a 10000 mAh para alimentar o sistema de iluminação.

22. O sistema de iluminação é composto por um conjunto de três LEDs: um full que emite radiação na faixa de comprimento de onda de 340 a 800 nm; um verde com pico de radiação no comprimento de onda de 550nm; e um infravermelho com pico de emissão em 850 nm. O sistema é responsável por emitir pulsos de iluminação de acordo com o usuário. Para tal, é usado um relé eletromagnético de 3 V controlado pelo CPU e um regulador de tensão em 5 V para a bateria de 2200 a 10000 mAh.

23. O Computador de Placa Única é responsável pelo controle dos componentes conectados a ele e pelo processamento de dados. Para o controle do sistema de iluminação por LEDs e dos dispositivos AS7265X e VL53L1X, bem como o processamento de dados e apresentação de informações para o usuário, foi criado um algoritmo em linguagem Python 3.2 responsável por conectar os sensores e fazer as leituras deles, emitir comandos para acionamento dos pulsos de iluminação, fornecer as instruções para o processamento dos dados recebidos e apresentação de informações pelo LCD, bem como a interação com o usuário. O algoritmo se diferencia principalmente pelas equações de calibrações e leituras dos dispositivos conectados ao CPU.

EXPERIMENTO DE DEMONSTRAÇÃO

24. Foi realizado um experimento comparando o equipamento de uso laboratorial de alta precisão e exatidão espectrorradiômetro FieldSpec® HandHeld 2TM com o dispositivo óptico portátil ativo multiespectral, este último, objeto do atual pedido de patente.

25. Foram utilizados para o experimento 13 padrões de cores obtidos pela impressora HP LaserJet CP1515n. A Figura 3 apresenta a assinatura espectral dos 13 padrões usados.

26. Durante o experimento foi colocado cada padrão de cor sobre uma superfície plana em uma câmara fria de dimensões internas de 2,33 x 2,11 x 2,14 m. Em primeiro momento, foram medidas as reflectâncias de cada um dos padrões pelo espectrorradiômetro. Durante as coletas de dados, o ambiente da câmara foi iluminado por duas lâmpadas halógenas (300 W, 127 V, 8700 lm). A iluminação a todo momento foi controlada e constante, haja vista a necessidade exigida pelo espectrorradiômetro, uma vez que este aparelho é afetado por mudanças da iluminação.

27. Após a coleta de dados pelo espectrorradiômetro, foram medidas as reflectâncias dos 13 padrões pelo dispositivo óptico portátil ativo multiespectral. O dispositivo não tem interferência da iluminação ambiente graças ao uso dos LEDs e sua estrutura em alumínio.

28. Posteriormente, com os dados coletados, foi feita a análise estatística de regressão linear com nível de significância de 1% ($p < 0,01$). As equações estatísticas que regem o comportamento das retas, para cada uma das 10 bandas dos comprimentos de onda medidas pelo dispositivo óptico portátil ativo multiespectral, seguem na Tabela 1 e os gráficos são apresentados na Figura 4.

Tabela 1: Equações de regressão linear em função das medidas de reflectâncias pelo espectrorradiômetro e pelo dispositivo óptico portátil ativo multiespectral

Comprimento de onda (nm)	Equações	R ²
435	$y = **0,9951 x$	0,926
460	$y = **1,0838 x$	0,950
535	$y = **1,0889 x$	0,940
560	$y = **0,9834 x$	0,969
645	$y = **0,9442 x$	0,988
680	$y = **0,8979 x$	0,965
705	$y = **0,9106 x$	0,966
730	$y = **0,912 x$	0,966
810	$y = **0,9707 x$	0,983
860	$y = **0,946 x$	0,994

R² :Coeficiente de determinação;

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F

Para x: Dispositivo óptico; e y: Espectrorradiômetro.

29. Avaliando os resultados na Tabela 1, nota-se que, para cada comprimento de onda medido, as equações de regressão entre as medidas de reflectâncias feitas pelos dois sensores revelaram uma forte relação de 1:1 entre eles. A Figura 4 mostra em melhor perspectiva o descrito. O menor R² foi de 0,9259 e o maior 0,9939. Tais resultados apontam excelente correlação linear positiva entre os sensores.

30. Para verificar se a iluminação ambiente interfere nas medidas das refletâncias pelo dispositivo óptico portátil ativo multiespectral, foi conduzido um experimento no ambiente interno da mesma câmara fria. Inicialmente foram realizadas medidas de refletâncias dos mesmos trezes padrões com o ambiente interno no escuro, isto é, com ausência completa de luz. Posteriormente, foram realizadas medidas com o ambiente iluminado por duas lâmpadas halógenas (300 W, 127 V, 8700 lm). De posse dos dados, foi feita uma análise de variância (ANOVA) a 1% de nível de significância para qualificar o efeito da iluminação sobre as medidas.

31. A Figura 5 apresenta o gráfico comparando o índice NDVI (índice de vegetação que relaciona matematicamente a refletância do comprimento de onda da cor vermelha, 645 nm, e infravermelho próximo, 860 nm) em ambiente iluminado e no escuro. A escolha do índice foi somente para exemplificar a estabilidade de leitura do dispositivo óptico portátil ativo multiespectral frente à variação da iluminação. Com índices de vegetação são relações entre refletâncias, é possível tirar conclusões também a respeito das refletâncias.

32. Comparando os resultados do experimento para testar o efeito da luz ambiente no desempenho do dispositivo óptico portátil ativo multiespectral (Figura 5) nota-se que não houve diferenças significativas entre as medições de NDVI nas duas condições de iluminação (no escuro e iluminadas por lâmpadas halógenas). A regressão entre as medidas de NDVI para os treze alvos utilizados nos testes revelou uma alta e forte relação de 1:1 entre as medidas realizadas no escuro e sob a luz (a inclinação foi de 1,0032; $R^2 = 0,998$). Além disso, a ANOVA revelou que a iluminação não teve efeito significativo nas medições.

33. O dispositivo óptico portátil ativo multiespectral mostrou ter ótima precisão, podendo ser usado tanto em laboratório quanto em campo. Não sofre efeito da variação da iluminação ambiente, apresenta uma única parte móvel, além de ter um custo de produção inferior a 2 mil reais e massa menor que 0,8 kg. Em contrapartida, o espectrorradiômetro sofre efeito com a variação da iluminação no ambiente de medição, é mais adequado para o uso em laboratório, tem massa superior a 1 kg e custo de aquisição maior que 100 mil reais, além de mais de uma parte móvel, dificultando a portabilidade.

CONCLUSÃO

34. Atualmente não há disponibilidade de sensores ópticos multiespectrais de baixo custo, sobretudo em países em desenvolvimento, que obtenha de uma superfície com precisão e facilidade os valores de reflectâncias de no mínimo 10 bandas do espectro eletromagnético.

35. O dispositivo óptico ativo portátil multiespectral, presente pedido de patente, tem o melhor custo-benefício e lê de forma precisa a reflectância de 10 bandas do espectro eletromagnético. É portátil, leve, com uma única parte móvel e pode ser usado para medições de reflectâncias tanto em ambiente de laboratório quanto em campo, de forma simples e acessível.

Reivindicações

1. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL** caracterizado por compreender estrutura de alumínio, na forma de tronco piramidal com 4 a 8 faces, conectado a uma capa plástica que contém um circuito eletrônico composto por Computador de Placa Única (CPU) conectado a um sistema de iluminação LED, sensor AS7265X, sensor VL63L1X, LCD 5110, regulador de tensão e baterias.
2. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL** caracterizado por medir a reflectância nos comprimentos de onda com pico em 435, 460, 535, 560, 645, 680, 705, 730, 810 e 860 nm.
3. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por as faces da estrutura de alumínio terem inclinação entre 10 e 30° em relação ao plano perpendicular ao plano visado, ângulo de abertura entre 20 e 60°, e formar uma área quadrada de lado 21,47 a 43,31 cm ou octogonal de 9,12 a 17,94 cm de lado, a uma distância de 27 cm entre o dispositivo multiespectral e a superfície alvo.
4. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por usar uma bateria de 7,4 a 11,1V de 5000 a 20000 mAh para alimentar o CPU, os sensores e o LCD e outra bateria de 7,4 a 11,1 V de 2200 a 10000 mAh para alimentar o sistema de iluminação.
5. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por o sistema de iluminação ser composto por um conjunto de três LEDs: um full que emite radiação na faixa de comprimento de onda de 340 a 800 nm, um verde com pico de radiação no comprimento de onda de 550 nm, e um infravermelho com pico de emissão em 850 nm.
6. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL**, de acordo com as reivindicações 1 e 4, caracterizado por o sistema de iluminação LED emitir

pulsos de radiação usando um relé eletromagnético de 3 V, controlado pelo CPU, e um regulador de tensão em 5 V para a bateria de 2200 a 10000 mAh.

7. **DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por compreender um algoritmo em linguagem Python 3.2 responsável por controlar o sistema de iluminação por LEDs, os sensores AS7265X e VL53L1X, processar os dados e apresentar as informações ao usuário.

Figuras



FIGURA 1

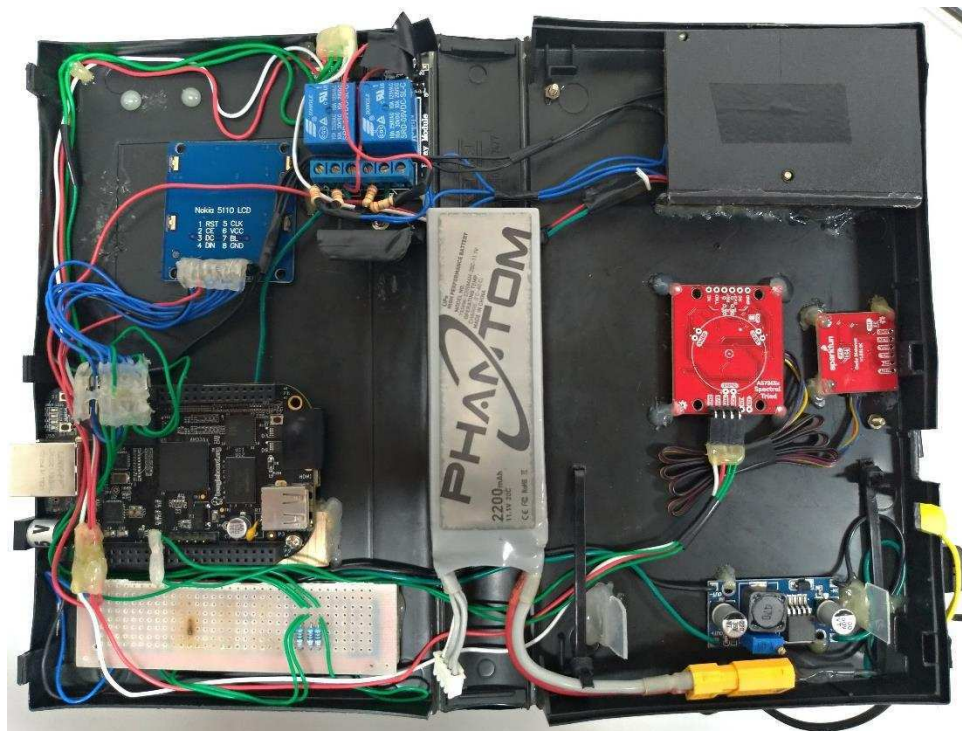


FIGURA 2

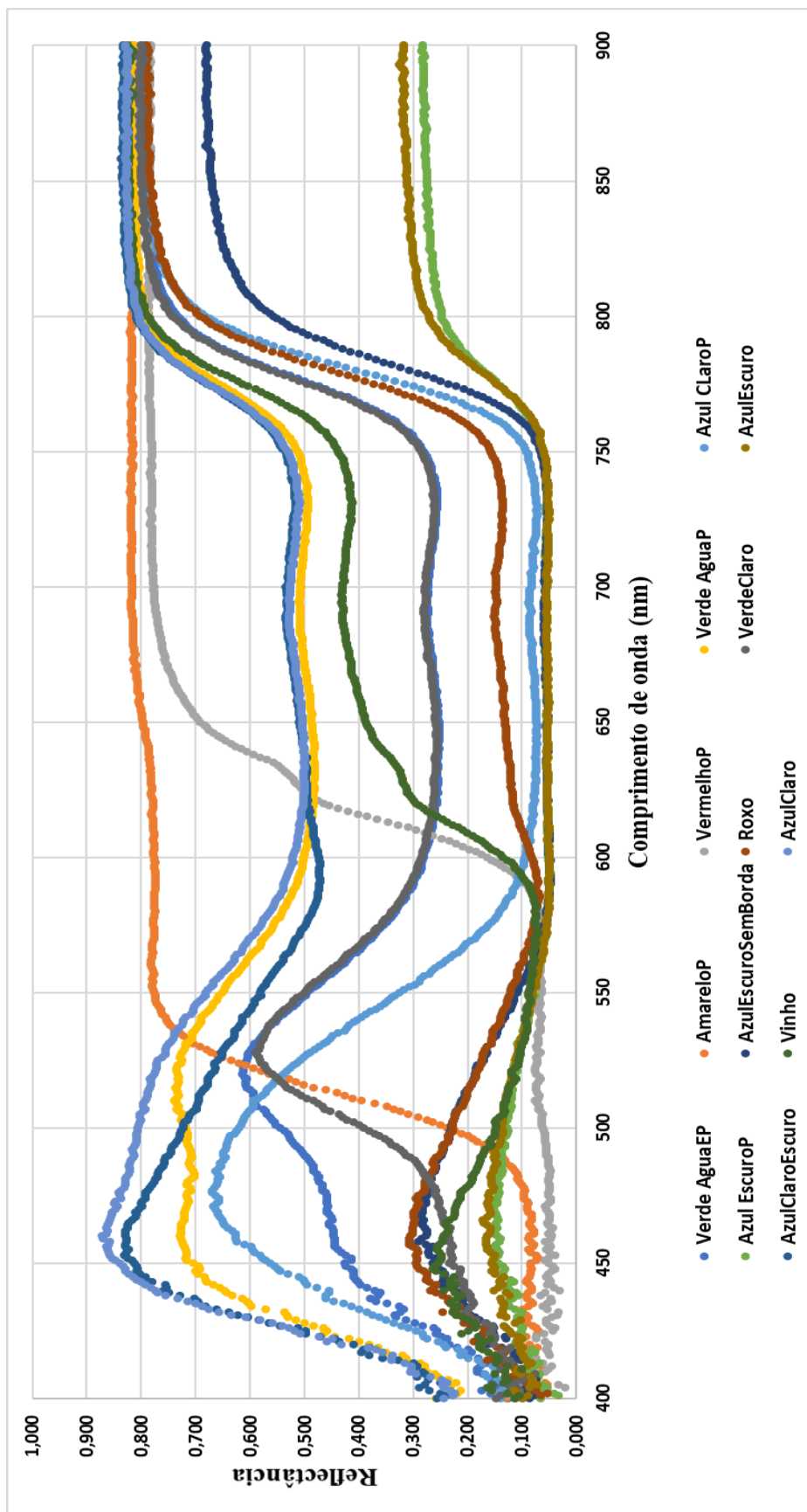
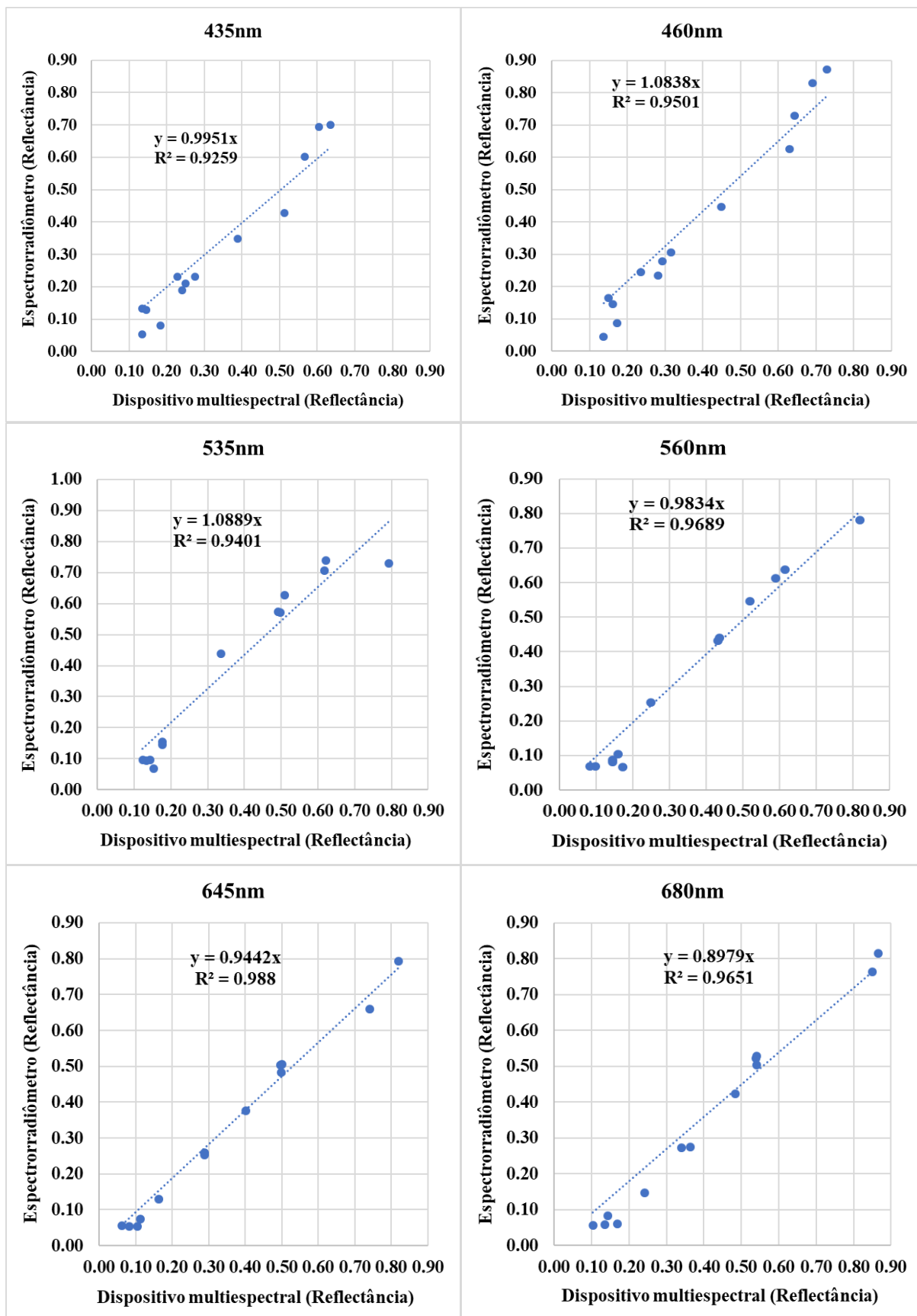


FIGURA 3



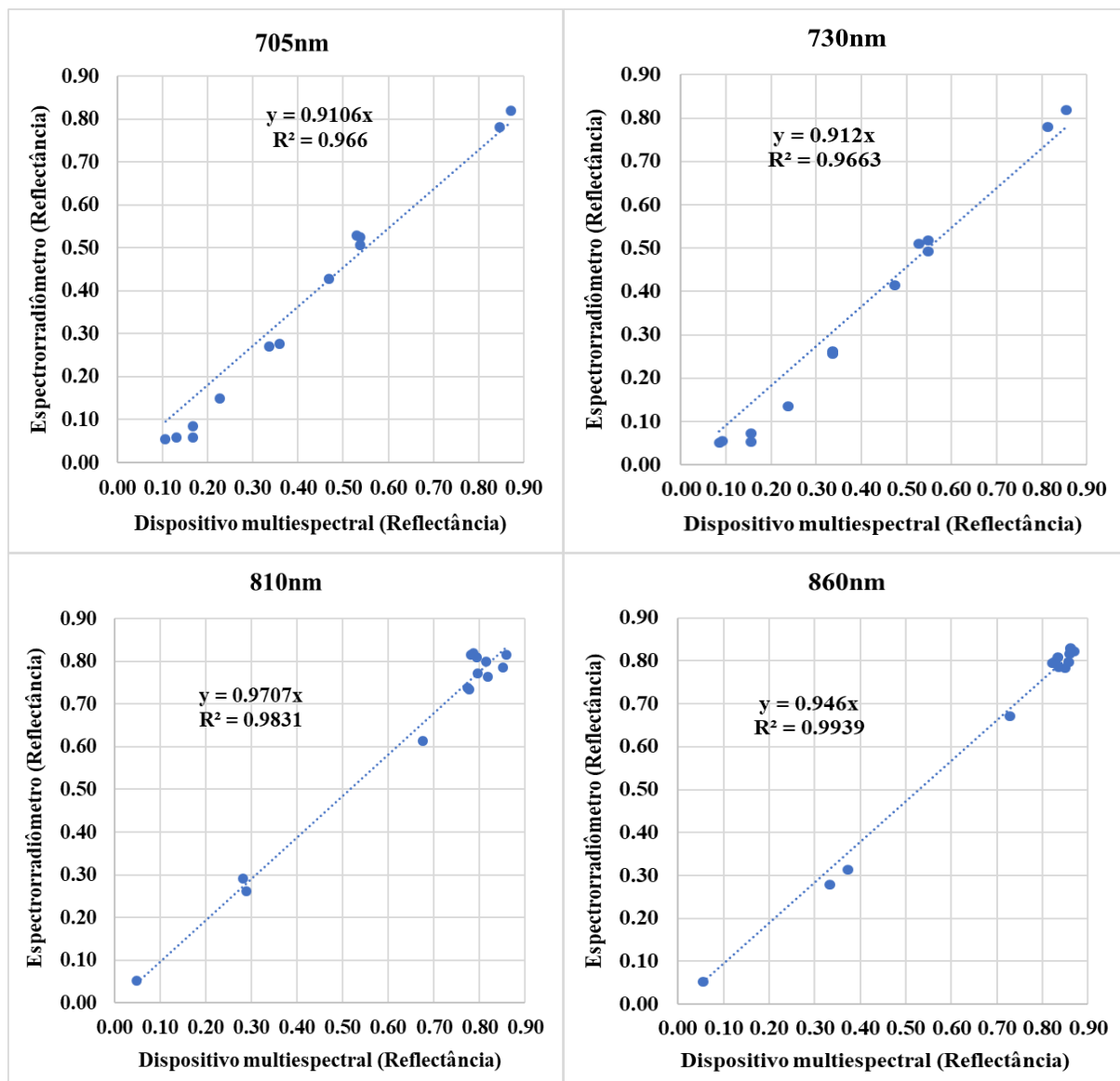


FIGURA 4

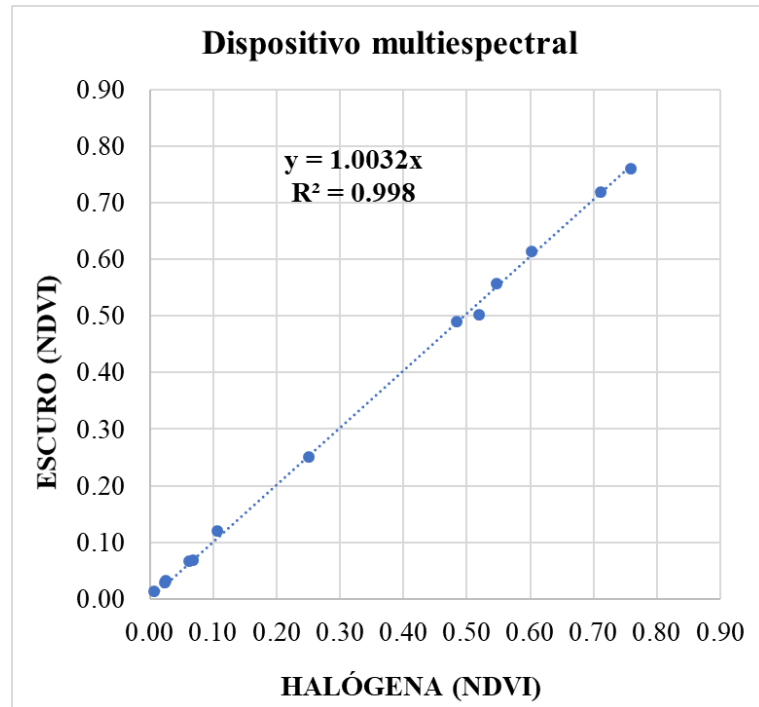


FIGURA 5

Resumo

DISPOSITIVO ÓPTICO ATIVO PORTÁTIL MULTIESPECTRAL PARA A MEDIDA DE REFLECTÂNCIAS E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

O presente pedido de patente refere-se a um dispositivo óptico ativo portátil multiespectral capaz de medir a reflectância de dez bandas do espectro eletromagnético com pico em: 435; 460; 535; 560; 645; 680; 705; 730; 810 e 860 nm, ao melhor custo-benefício existente no Brasil e no mundo. Com a invenção é possível calcular inúmeros índices de vegetação com eficiência, rapidez e praticidade das mensurações, sendo aplicada no setor de agricultura de precisão e de espectroscopia em laboratório.