

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SENSORES DE DOSSEL NO MONITORAMENTO DA  
VARIABILIDADE TEMPORAL DAS CULTURAS DA SOJA E  
DO AMENDOIM**

**Franciele Morlin Carneiro  
Engenheira Agrônoma**

**2018**

**T  
E  
S  
E**

**/**

**C  
A  
R  
R  
N  
E  
I  
R  
O**

**F.  
M.**

**2**

**0**

**1**

**8**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SENSORES DE DOSSEL NO MONITORAMENTO DA  
VARIABILIDADE TEMPORAL DAS CULTURAS DA SOJA E  
DO AMENDOIM**

**Franciele Morlin Carneiro**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani**

**Coorientadores: Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva**

**Prof. Dr. Rafael Scabello Bertonha**

**Profa. Dra. Brenda V. Ortiz**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

**2018**

C289s Carneiro, Franciele Morlin  
Sensores de dossel no monitoramento da variabilidade das  
culturas da soja e do amendoim / Franciele Morlin Carneiro. --  
Jaboticabal, 2018  
iv, 107 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientadores: Rouverson Pereira da Silva, Rafael Scabello  
Bertonha, Brenda V. Ortiz

Banca examinadora: Cristiano Zerbato, Carlos Alessandro  
Chioderoli, Leandro Borges Lemos, Jorge Wilson Cortez

Bibliografia

1. Agricultura de precisão. 2. *Arachis hypogaea*. 3. Cartas de  
controle. 4. *Glycine max*. 5. Sensoriamento remoto. I. Título. II.  
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633:528.8

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SENSORES DE DOSSEL NO MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE TEMPORAL DAS CULTURAS DA SOJA E DO AMENDOIM

**AUTORA: FRANCIELE MORLIN CARNEIRO**  
**ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI**  
**COORDENADOR: ROUVERSON PEREIRA DA SILVA**  
**COORDENADOR: RAFAEL SCABELLO BERTONHA**  
**COORDENADORA: BRENDA VALESKA ORTIZ**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. CARLOS ALESSANDRO CHIODEROLI  
Departamento de Agronomia/UFTM / Iturama/MG



Prof. Dr. CRISTIANO ZERBATO  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. JORGE WILSON CORTÉZ  
Universidade Federal da Grande Dourados / UFGD - Dourados/MS



Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS  
Departamento de Produção Vegetal / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 27 de julho de 2018

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

FRANCIELE MORLIN CARNEIRO – nascida em 16 de junho de 1990, no município de Uberaba, Minas Gerais, possui formação no curso de Engenharia Agrônômica (2014) no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro - Câmpus Uberaba. Durante a graduação foi voluntária na área de olericultura por dois anos (2009 a 2011), em 2010 foi monitora das disciplinas de Cálculo I e II, por conseguinte, nos anos de 2011 a 2012 possuiu bolsa de iniciação científica PIBIC/FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais, e ainda, no ano de 2012 teve bolsa institucional de iniciação científica do IFTM - Câmpus Uberaba. Em 2014 a 2015 realizou o mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, sendo bolsista da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, foi integrante do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola – LAMMA, onde pode realizar pesquisas voltadas para a área de máquinas e mecanização agrícola, avaliando um protótipo de adubadora-formuladora para a cultura da cana-de-açúcar. Em agosto de 2015 iniciou o doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, sendo bolsista CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, também foi integrante do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola – LAMMA, onde realizou pesquisas voltadas trabalhos na área de máquinas e mecanização agrícola como também em sensoriamento remoto, especialmente com sensores de dossel. Em 2017 realizou estágio sanduíche por 6 meses na Universidade de Auburn, Alabama, EUA, auxiliando a Profa Dra. Brenda V. Ortiz em suas pesquisas na área de Agricultura de Precisão, com a utilização de sensores de planta e solo para o manejo com taxa variada em irrigação.

“Não desista jamais, nunca deixe de sonhar e acreditar nos seus sonhos, persista sobre os seus objetivos, por pior que pareçam as dificuldades tenha a fé no criador, tenha a fé em Deus, acredite no que Ele reservou para você. Não deixe de sonhar, não deixe de acreditar em você, no ser humano, na vida.” (Júlio di Paula)

"E quando eu tiver 1% de chance eu não vou desistir." (Cássinho Augusto). "A vida é uma sequência de desafios, nunca desista... corra atrás dos seus sonhos, faça de tudo e realize-os, por que mais pra frente vai parar, pensar e ver como valeu a pena!" (Bárbara Jaqueline)

## DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus pais Carivaldo e Marilda; ao meu irmão Carivaldo Júnior; as minhas avós (Zenaide e Áurea), aos meus avôs Arlindo e Wilson (*in memoriam*), aos familiares, amigos e ao funcionário Ronaldo José de Barros (*in memoriam*). E a todos que me apoiaram durante o doutorado.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela proteção, fé, esperança e força, como também por sempre iluminar o meu caminho mostrando a melhor decisão a ser tomada, e ainda, me permitindo obter vitória em cada obstáculo vencido no percurso da vida.

Aos meus pais Carivaldo e Marilda pela vida, carinho, por todo apoio, incentivo e ensinamentos para que eu pudesse me tornar uma pessoa melhor por meio de aprendizagens e ensinamentos.

Ao meu irmão Carivaldo Júnior, as avós, avôs, as madrinhas, padrinhos, primos, primas, afilhada, enfim, a toda minha família pelo apoio, confiança e carinho.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Jaboticabal pela oportunidade de realização do doutorado, ensinamentos e pelos novos conhecimentos adquiridos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado concedida.

Aos meus grandes mestres, meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani, por ter sido ótimo orientador, e, aos meus coorientadores Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, Dr. Rafael Scabello Bertanha, e a Profa. Dra. Brenda V. Ortiz por todo apoio, orientação, incentivo, dedicação, amizade e pelos ensinamentos na área de mecanização agrícola e sensoriamento remoto com sensores de planta e solo, contribuindo na minha formação profissional.

Ao Prof Dr. Cristiano Zerbato por ter me ajudado na elaboração e condução dos experimentos da Tese, e pelos ensinamentos voltados para a área de agricultura de precisão, mais especificamente, em sensoriamento remoto utilizando sensores de planta.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural Valdecir Aparício, Sebastião Francisco da Silva Filho e Ronaldo José de Barros (*in memoriam*), pela ajuda durante o desenvolvimento do experimento, nas coletas de dados e pela amizade.

Aos meus amigos Patricia Menezes, Lucas Gírio, Ana Júlia Menezes, Maria Fernanda Menezes, Maryelle Cury e Amanda Silveira pela amizade verdadeira e sincera durante todo percurso, estando ao meu lado em todos os momentos, além do incentivo e confiança.

Aos meus amigos do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA), Patricia Menezes, Lucas Gírio, Aline Alcântara, Renata Queiroz, Mailson de Oliveira, Francisca Nivanda de Estevam, Maria Albertina, Francisca Edcarla Nicolau, Rafael de Graaf, Luan de Oliveira, Leonardo Bernache, Antonio Tassio, Elizabeth Kazama, Matheus Borba, Aycon Tinoco, Carla Paixão, Murilo Voltarelli, Cristiano Zerbato, Leane de Souza, Rafael Bertonha, Lígia Negri, Adão dos Santos, Felipe Santinato, Rafael Noronha, André Damasceno, Tiago Tavares, Danilo Tedesco, enfim, a toda equipe do LAMMA pela amizade, ajuda no decorrer dos experimentos, e ainda, por terem dado dicas para a melhoria do trabalho, deixando-o mais enriquecido com novas informações. E aos meus outros amigos pertencentes a outros laboratórios da Unesp, Magda Martins, Paula Pilotto, Priscila Diniz, Alex e Aline.

Aos estagiários do LAMMA por terem me ajudado nas coletas dos dados a campo e na tabulação dos mesmos.

Aos proprietários da Fazenda Resfriado, no município de Dumont-SP, agradeço a toda família Carneiro por terem permitido a condução do experimento de amendoim em sua propriedade, e por me ajudarem em tudo que precisava durante a condução do mesmo.

A Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) por terem deixado eu conduzir o experimento de soja.

Aos Professores Doutores Leandro Borges Lemos, Rinaldo Cesar de Paula, Marcelo da Costa Ferreira, David Luciano Rosalen, Jorge de Luca Junior pelo empréstimo de equipamentos para a realização dos experimentos.

Aos membros da Banca Examinadora por terem aceito o convite para compor a banca. Agradeço também pelas grandes contribuições na melhoria e enriquecimento do trabalho por meio da arguição e correção.

As empresas AgLeader e SkyMap, pelo empréstimo do sensor OptRx e pelo mapeamento das áreas experimentais por meio de Veículo aéreo não tripulado (VANT), respectivamente.

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>CAPÍTULO 1 - Considerações gerais.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>Agricultura de Precisão.....</b>	<b>4</b>
<b>Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>5</b>
<b>História do Sensoriamento Remoto.....</b>	<b>5</b>
<b>Conceitos básicos.....</b>	<b>7</b>
<b>Sensores de dossel.....</b>	<b>12</b>
<b>Índices de vegetação.....</b>	<b>13</b>
<b>Controle Estatístico de Qualidade.....</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 2 – Correlação entre índices de vegetação e características de amendoim em múltiplos estádios de desenvolvimento.....</b>	<b>26</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>27</b>
<b>Material e Métodos.....</b>	<b>29</b>
<b>Descrição da área experimental.....</b>	<b>29</b>
<b>Delineamento experimental.....</b>	<b>30</b>
<b>Máquinas e equipamentos agrícolas.....</b>	<b>31</b>
<b>Sensores de reflectância de dossel.....</b>	<b>31</b>
<b>Índices de vegetação espectral.....</b>	<b>34</b>
<b>Indicadores de qualidade.....</b>	<b>35</b>
<b>Análises estatísticas.....</b>	<b>37</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>38</b>
<b>Discussão.....</b>	<b>42</b>
<b>Conclusões.....</b>	<b>45</b>

Referências .....	45
<b>CAPÍTULO 3 – Uma comparação da eficácia de três índices de vegetação na detecção da variabilidade da cultura da soja utilizando sensores de dossel....</b>	<b>54</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>55</b>
<b>Material e Métodos .....</b>	<b>57</b>
<b>Descrição da área experimental .....</b>	<b>57</b>
<b>Delineamento experimental .....</b>	<b>58</b>
<b>Equipamentos .....</b>	<b>59</b>
<b>Sensores ativos de dossel .....</b>	<b>59</b>
<b>Índices de vegetação .....</b>	<b>60</b>
<b>Indicadores de qualidade .....</b>	<b>61</b>
<b>Análises estatísticas .....</b>	<b>62</b>
<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>63</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>70</b>
<b>Referências .....</b>	<b>70</b>
<b>CAPÍTULO 4 – Comportamento dos índices de vegetação para as culturas de soja e amendoim .....</b>	<b>81</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>82</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>84</b>
<b>Sensoriamento remoto com os sensores ativos de dossel .....</b>	<b>88</b>
<b>Índice de vegetação .....</b>	<b>89</b>
<b>Parâmetros avaliados .....</b>	<b>89</b>
<b>Análises estatísticas .....</b>	<b>90</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>CAPÍTULO 5 – Considerações finais .....</b>	<b>106</b>

## SENSORES DE DOSEL NO MONITORAMENTO DA VARIABILIDADE TEMPORAL DAS CULTURAS DA SOJA E DO AMENDOIM

**RESUMO** – Técnicas de Sensoriamento Remoto estão sendo aplicadas na agricultura e tem demonstrado grande potencial em seu uso por apresentar ótimas vantagens, tais como, método não destrutivo, rápido, obtenção de dados em tempo real, proporciona o monitoramento da variabilidade temporal da cultura ao longo dos estádios de crescimento da planta, dentre outras. Assim, os objetivos deste trabalho foram: (i) determinar qual estágio de desenvolvimento da cultura obtêm-se o tempo ótimo de coleta das leituras dos sensores por meio das melhores correlações entre os indicadores de qualidade (índices de vegetação x biomassa fresca e seca, largura de dossel, índice de clorofila, produtividade e maturação); (ii) comparar os índices de vegetação (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI, Normalized Difference Red-Edge Index - NDRE, e Inverse Ratio Vegetation Index - IRVI) por meio do monitoramento da variabilidade temporal nas culturas do amendoim e da soja, proporcionará as melhores qualidades de leitura ao longo do processo; (iii) avaliar o comportamento dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) com a biomassa fresca e seca, o índice de clorofila e a produtividade para a cultura da soja e do amendoim, como também, verificar a evolução destes índices por meio do estágio de desenvolvimento das culturas. Os experimentos foram realizados na safra de 2016/17, para o estudo do comportamento espectral das culturas da soja e do amendoim como também da variabilidade temporal dos índices de vegetação, em áreas agrícolas nos municípios de Dumont e de Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil. O delineamento experimental dos experimentos foi baseado no Controle Estatístico de Qualidade – CEQ. Nos experimentos de amendoim e da soja incluíram 63 e 65 pontos amostrais, respectivamente, com GRID 30 x 30 m. As avaliações foram realizadas aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS), correspondendo desde o estágio vegetativo das culturas até o R6, por meio do sensoriamento remoto a nível de coleta terrestre com a utilização de dois sensores de dossel (GreenSeeker e OptRX) para a análise do comportamento dos indicadores de qualidade, como a biomassa fresca e seca, índice de clorofila, produtividade e os índices de vegetação (NDVI e NDRE). Os índices de vegetação NDRE e NDVI apresentaram alto potencial para a detecção no monitoramento das culturas da soja e do amendoim durante o estágio de desenvolvimento, principalmente o NDRE por ser menos sensível a saturação da sua leitura com o incremento da biomassa. O tempo ótimo de leitura de acordo com as análises de correlação e regressão apresentaram que aos 45 e 60 DAS (estádio de desenvolvimento R1 e R2 do amendoim, e da soja V5 e V6) mostraram os melhores valores. Houve interferências entre as culturas nas leituras dos sensores por apresentarem comportamento espectral diferente em virtude da morfologia e fisiologia vegetal se diferirem.

**Palavras-chave:** agricultura de precisão, *Arachis hypogaea*, cartas de controle, *Glycine max*, sensoriamento remoto

## CANOPY SENSORS IN MONITORING OF THE TEMPORAL VARIABILITY SOYBEAN AND PEANUT CROPS

**ABSTRACT** – Remote Sensing Techniques are being applied in agriculture and have demonstrated great potential in their use because they present great advantages, such as non-destructive method, fast, obtaining data in real time provides the monitoring of the temporal variability of crop growth stages, among others. Thus, the objectives of this work were: (i) to determine the crop growth stages, the optimal time for collecting the sensor readings was obtained through the best correlations between the quality indicators (vegetation indices x fresh and dry biomass, canopy width, chlorophyll index, yield and maturation); (ii) to compare vegetation indices (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI, Normalized Difference Red-Edge Index - NDRE, and Inverse Ratio Vegetation Index - IRVI) by monitoring temporal variability in peanut and soybean crops, determining which of them obtained the best reading qualities throughout the process; (iii) to evaluate the behavior of vegetation indices (NDVI and NDRE) with fresh and dry biomass, chlorophyll index and yield for soybean and peanut, as well as to verify the evolution of these indices through the stage development. The experiments were performed on the 2016/17 season to study the spectral behavior of the soybean and peanut crops as well as the temporal variability of vegetation indices in agricultural areas in the municipalities of Dumont and Jaboticabal, in the state of São Paulo, Brazil. The design of experiments was based on the basic assumptions of the Statistical Quality Control – SQC, containing 63 and 65 sample points with GRID 30 x 30 m. The parameters were evaluated at 30, 45, 60, 75, and 90 days after sowing (DAS), from vegetative stages to R6, by means of proximal sensing using the GreenSeeker and OptRX sensors for the analysis of the behavior of quality indicators, such as fresh and dry biomass, chlorophyll index, yield and vegetation indices (NDVI and NDRE). The NDRE and NDVI presented high potential for detection and monitoring of soybean and peanut crops during the growth stage, especially NDRE because it is less sensitive to the saturation reading with the increase of the biomass. The optimal time according to the correlation and regression analyzes showed that at 45 and 60 DAS (peanut development stages R1 and R2, and soybean V5 and V6) showed the best values. There were interferences between crops in the sensor readings because they presented different spectral behavior because of physiological and morphological plant if they differ.

**Keywords:** precision agriculture, *Arachis hypogaea*, control charts, *Glycine max*, remote sensing

## **CAPÍTULO 1 - Considerações gerais**

### **INTRODUÇÃO**

A tese é composta por capítulos com temas abordados na área de Agricultura de Precisão (AP), com enfoque em Sensoriamento Remoto a nível de coleta terrestre utilizando sensores de dossel ou sensores ópticos ativos, pois é uma das áreas que têm se destacado na AP. Foram realizadas análises do comportamento espectral das culturas da soja e do amendoim, verificando ao longo do desenvolvimento das culturas, os períodos mais propícios para a utilização dos sensores ópticos ativos ou de dossel, sendo que as análises foram feitas a nível terrestre com a utilização dos sensores ópticos ativos GreenSeeker<sup>®</sup> e OptRx<sup>®</sup>. O tema estudado neste trabalho possui grande relevância para a área acadêmica demonstrando maior conhecimento da variabilidade temporal da cultura e a diferença entre elas, devido as características biofísicas possuírem peculiaridades, em virtude da morfologia das folhas, idade da planta, estrutura de dossel, altura da planta, dentre outras.

No primeiro capítulo, é abordado referencial teórico da importância da Agricultura de Precisão, mais especificamente, reportando as técnicas do Sensoriamento Remoto, apresentando suas aplicações na agricultura e sua importância tanto para área acadêmica quanto para o produtor rural.

No segundo e terceiro capítulos, são apresentados os resultados da tese com a aplicação das técnicas do Sensoriamento Remoto nas culturas do amendoim e da soja, em que foi utilizado o Controle Estatístico de Processo com cartas de controle, que demonstrou ser uma ótima ferramenta de qualidade para o monitoramento do comportamento dos índices de vegetação durante os estádios de crescimento das culturas, facilitando a visualização da diferença entre os índices (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI, Normalized Difference Red-Edge Index - NDRE, and Inverse Ratio Vegetation Index - IRVI). Além disso, também foi realizada análises de correlação de Pearson para identificar quais características biofísicas (altura e largura do dossel, índice de clorofila, produtividade, maturação, biomassa fresca e seca), que mais se correlacionam com os índices avaliados. Em complemento as

cartas de controle e as análises de correlação, foram realizadas análises descritivas para o maior entendimento do comportamento dos resultados.

No quarto capítulo, é analisado o comportamento dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) com as características biofísicas (biomassa fresca e seca, o índice de clorofila e a produtividade) das culturas da soja e do amendoim. Por fim, no quinto capítulo, são realizadas as considerações finais dos capítulos estudados demonstrando os melhores resultados obtidos entre eles de forma objetiva e coesa.

O Controle Estatístico de Qualidade foi a análise estatística usada nos capítulos dois e três, ainda não é utilizada na área de Sensoriamento Remoto devido à pouca ciência da aplicabilidade a nível mundial desta estatística na área de Ciências Agrárias, sendo que é muito usada no ramo industrial para o controle de qualidade do processo. Neste trabalho esta estatística demonstrou grande potencial para o monitoramento temporal da qualidade de leitura entre os índices de vegetação, facilitando a detecção no momento em que o NDVI ocorre a saturação.

## **OBJETIVOS**

1. Determinar o estágio de desenvolvimento da cultura que representa o tempo ótimo de coleta das leituras dos sensores por meio das melhores correlações entre os indicadores de qualidade avaliados (índices de vegetação x biomassa fresca “in natura” e seca, largura do dossel, índice de clorofila, produtividade e maturação). Comparar os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) por meio do monitoramento da variabilidade temporal na cultura do amendoim, observando qual proporciona as melhores qualidades de leitura ao longo do processo.

2. Comparar o potencial e o desempenho de três índices de vegetação por meio dos sensores de dossel, monitorando a variabilidade temporal para os parâmetros biomassa fresca e seca, altura de plantas, índice de clorofila, produtividade, e ainda verificar o tempo ótimo de leituras dos sensores durante os estágios de desenvolvimento da cultura.

3. Avaliar o comportamento dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) com a biomassa fresca e seca, o índice de clorofila e a produtividade para a cultura da soja

e do amendoim, como também, verificar a evolução destes índices por meio do estágio de desenvolvimento das culturas.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Agricultura de Precisão

A agricultura no Brasil tem demonstrado sucesso inquestionável, sustentando níveis muito positivos na balança comercial como também responsável por parte substancial do desempenho da economia nacional. Para tanto, o avanço tecnológico e científico, associado aos aspectos de logística, gerenciamento, empreendedorismo dentre outros, devem ser contínuos, principalmente num mundo competitivo e globalizado. Assim, a agropecuária terá que responder à demanda do aumento populacional, em um ambiente mais competitivo e restrito, quando se pensa em longo prazo (Epiphanyo, 2017).

Têm se verificado que os recursos naturais estão cada vez mais escassos, devido à crescente demanda por energia, alimentos e outros produtos provenientes da agricultura. Visando a segurança alimentar e à sustentabilidade, a produção agrícola necessita ser otimizada, realizando a gestão dos cultivos com o menor consumo de insumos possível e a máxima produtividade das culturas, visto que, a Agricultura de Precisão (AP) ganha cada vez mais adeptos e está sendo prática essencial (Molin et al., 2015).

Em torno de 62% das terras destinadas para agropecuária têm sido usadas para à produção de alimentos humanos, 3% para bioenergia, e 35% para à alimentação animal (Foley et al., 2011; Faostat, 2015).

Estudos internacionais verificaram que até o ano de 2050, para atender às demandas de sustentabilidade, de segurança alimentar (não deixar faltar alimento) e de governança, será preciso de fato duplicar os atuais níveis da produção agrícola do planeta, conseqüentemente, a “pegada ambiental” da agricultura necessitará ser encolhida drasticamente (Foley et al., 2011; The Royal Society, 2016).

Isso também foi observado pelos pesquisados Narvaez et al. (2017), a necessidade de dobrar a produção agrícola até 2050 em função do crescimento populacional, estes autores viram que a Agricultura de Precisão é a chave para melhorar a eficiência da utilização de recursos e da produtividade, auxiliando alcançar esta meta sob os vários desafios encontrados na agricultura, especialmente, em

virtude do aumento dos custos, degradação da terra, terras agricultáveis disponíveis, mudanças climáticas, e pouca mão-de-obra.

A AP apresenta muitos benefícios potenciais, tais como, sustentabilidade, proteção ambiental, segurança alimentar, produtividade, desenvolvimento econômico rural, rentabilidade, qualidade da cultura e de vida (Shiratsuchi et al., 2014). A AP usa abordagens modernas e científicas, associadas com tecnologias de informação para uma produção agrícola inteligente e com os conhecimentos tradicionais. Assim, técnicas do Sensoriamento Remoto apresentam relevante papel no campo em diagnósticos como avaliação nutricional e da necessidade hídrica das plantas, previsão do tempo, detecção de doenças e pragas, e a estimativa da produtividade (Shiratsuchi et al., 2014).

Em complemento, a AP tem utilizado tecnologias mais sofisticadas de sistemas de aplicações de taxas variadas de produtos agroquímicos adaptadas e combinadas com sistemas SIG (Sistema de Informação Geográfica) e sensoriamento remoto (imagens de satélite, indução eletromagnética, fotografia aérea, etc.), sistemas de monitoramento de campo, sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System), ou tecnologias de medidas rápidas de propriedades do solo, como por exemplo, TDR (Time Domain Reflectometry) e a resistividade elétrica (Plant, 2001).

Na AP tem-se o uso extensivo de geotecnologias, como o sensoriamento remoto, obtendo informação dos objetos por meio dos sensores sem que haja o contato físico. Estes sistemas são fundamentados em comprimentos de onda específicos empregados para calcular índices de vegetação utilizados para estimar os componentes da produção agrícola, entre outras aplicações (Zerbato et al., 2016).

## **Sensoriamento Remoto**

### **História do Sensoriamento Remoto**

A história do Sensoriamento Remoto (SR) é um tema muito controverso, sendo que alguns autores restringem o SR ao desenvolvimento dos sensores fotográficos e quanto a sua utilização para reconhecimento do terreno e atividades de defesa (Novo, 2008).

Outros dizem que a história do SR vincula-se ao uso militar, na qual o SR foi o utilizado na Primeira e Segunda Guerra Mundial, sendo que na Primeira Guerra foi usado fotografias aéreas tiradas de aviões que foram intensificadas o seu uso. Na Segunda Guerra Mundial, o SR apresentou maior desenvolvimento, e foi criado o filme infravermelho para identificação de camuflagem, visando diferenciar alvos pintados de verde da vegetação (Florenzano, 2011). Ainda o mesmo autor cita que a origem do SR está relacionada ao surgimento da fotografia aérea, podendo ser dividida em dois períodos: um, fundamentado no uso de fotografias aéreas, de 1860 a 1960; e outro de 1960 aos dias atuais, caracterizando por diversos tipos de imagens de satélite.

O SR aplicado na agricultura tem sido estudado desde a década de 1970 (Formaggio e Sanches, 2017). Os Estados Unidos foi o país pioneiro com a utilização de dados de satélite, aplicando o SR na agricultura, por meio do lançamento do primeiro satélite da série Landsat, a princípio conhecido como ERTS – Earth Resources Technology Satellite (Macdonald et al., 1975).

Desde a década de 1970, o país que mais tem demonstrado pesquisas com a utilização de estatísticas agrícolas por meio dos dados de SR foram os Estados Unidos, sendo o NASS (National Agricultural Statistics Service) responsável por esses avanços. Já no Brasil, desde o início da década de 1970, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) apresenta um importante papel da área de geotecnologias, com a utilização do SR a nível nacional e fortalecendo o país por ser um dos mais desenvolvidos nesta área no hemisfério sul (Formaggio e Sanches, 2017).

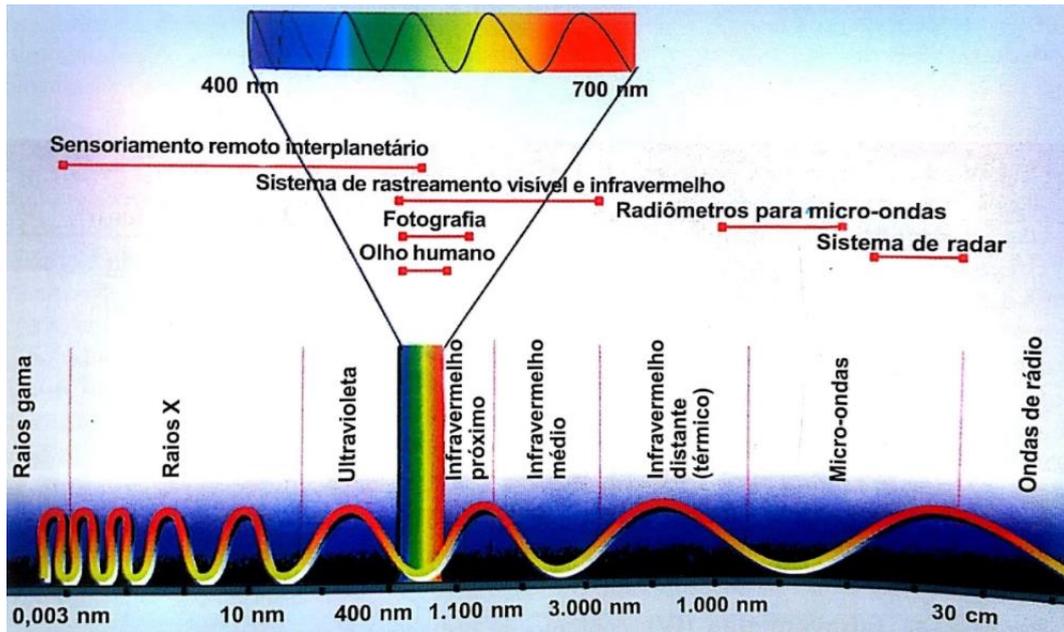
Com o intuito de proporcionar metodologias destinadas a completar os métodos tradicionais de estatísticas agrícolas adotados pelos órgãos oficiais, especialmente o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), no Brasil, desde a década de 1980, têm sido efetuados desenvolvimentos e avaliações de técnicas de geoprocessamento como também de dados de sensoriamento remoto (Formaggio e Sanches, 2017). No Brasil, a estimativa das áreas semeadas com culturas de verão é realizada pelo IBGE a nível municipal com o uso de métodos subjetivos por meio de entrevistas com agricultores ou entidades ligadas ao setor agrícola, como comércios de insumos, cooperativas, bancos fornecedores de crédito rural, etc. (Formaggio et al., 2003).

## Conceitos básicos

O Sensoriamento Remoto (SR) está diretamente relacionado com a medida da radiação eletromagnética, emitida ou refletida dos alvos da superfície terrestre, assim como a disponibilização dessa informação numa forma passível de ser interpretada e ao tratamento. De forma que, qualquer fonte de energia, desde que essa energia possa ser transformada num produto interpretável e ser medida (Moreira, 2011).

A radiação eletromagnética é proveniente a partir da transformação de outras formas de energia, como nuclear, química, cinética ou térmica (Novo, 2008). Para o SR da superfície da Terra, o Sol é considerado a principal fonte de radiação eletromagnética. A produção de energia do Sol é feita por meio do ciclo próton-próton, em que, quatro moléculas de hidrogênio são convertidas para um átomo de hélio e energia na forma de neutrinos e fótons (Moblely, 1994). O resultado final do ciclo próton-próton é a conversão de quatro átomos de hidrogênio em um átomo de hélio, sendo que a energia vai estar em forma de neutrinos e fótons (comprimento de onda na faixa de raios gama, e são altamente energéticos), ocorre alta interação com a matéria e são sucessivamente absorvidos, reemitidos e espalhados pela superfície do Sol, havendo a perda de energia desses fótons de modo que se transformam em radiação infravermelha e visível, quando deixam a superfície do Sol em direção ao espaço (Novo, 2008).

A energia eletromagnética utilizada no SR, seja ela originária de pulsos por uma antena radar, ou do Sol ou emitida pelos alvos, geralmente, é dividida em faixas espectrais ou regiões (Figura 1), em termos de comprimento de onda ou de frequência (Lorenzetti, 2015).

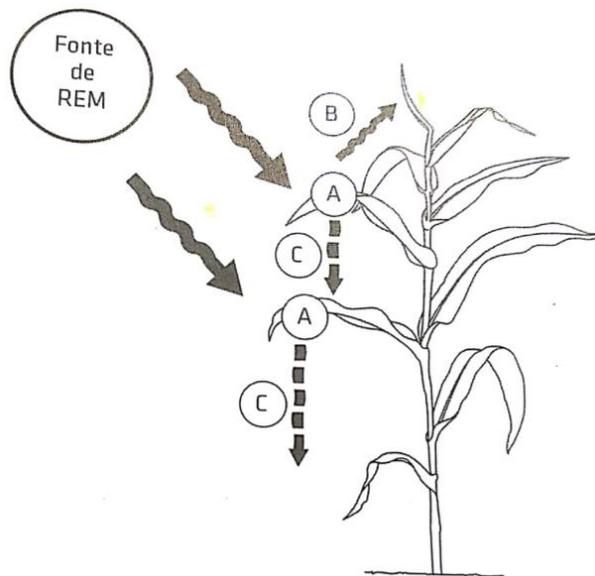


Fonte: Moreira (2011).

**Figura 1.** Espectro eletromagnético da radiação eletromagnética.

O espectro eletromagnético (Figura 1), é todo o conjunto de comprimentos de onda, desde os raios gama até as ondas de rádio (Novo, 2008), sendo que, grande parte dos sistemas sensores trabalham nos comprimentos de onda do infravermelho próximo e do visível, não havendo interferência, dos dados obtidos pelo SR, da radiação emitida pela superfície terrestre (Moreira, 2011), devido a atmosfera ser opaca em várias regiões do espectro eletromagnético, os comprimentos de ondas na faixa do raio X, raio ultravioleta e raio gama não são transmitido pela atmosfera (Novo, 2008).

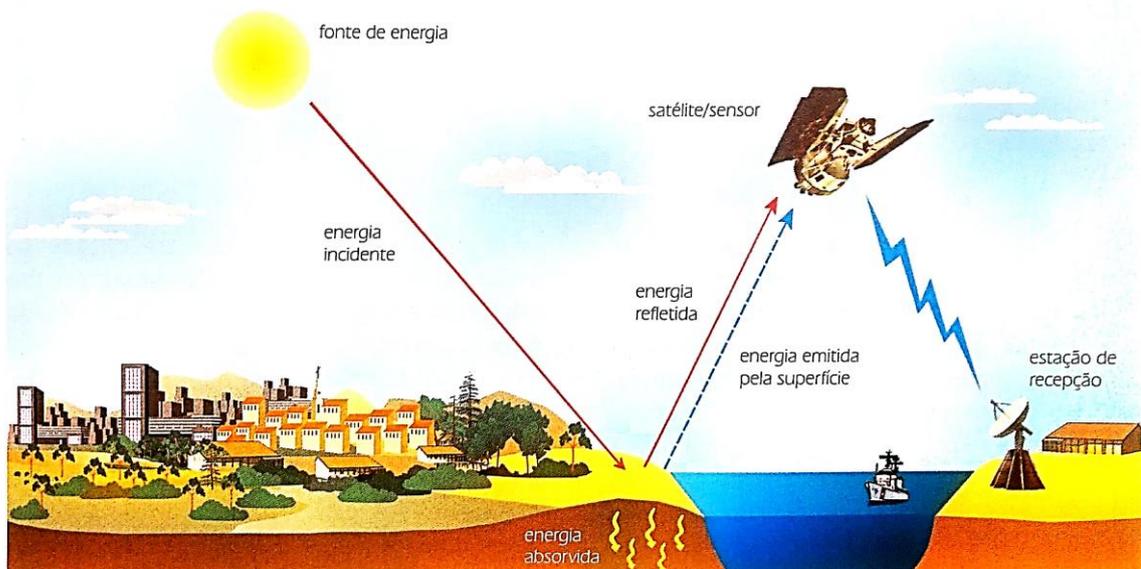
Quando a radiação eletromagnética originária do sol ou de sistemas ativos de sensores ao atingir o objeto acontece a interação com a energia e o alvo que tende a ser a fragmentada em três partes: transmitida, absorvida e refletida (Figura 2). De todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, as faixas mais usadas na agricultura são do infravermelho próximo e do visível (Molin et al., 2015).



Fonte: Molin; Amaral & Colaço (2015).

**Figura 2.** Radiação eletromagnética quando ao atingir o alvo, a energia será absorvida (A), refletida (B) ou transmitida (C).

O SR clássico é baseado principalmente em imagens adquiridas por câmeras acopladas em plataformas orbitais e aéreas, que pode ser definido como a arte ou a ciência para a obtenção de informações sobre uma área, fenômeno ou objeto (Figura 3), por intermédio de dados obtidos por um sistema sensor (equipamento), não havendo contato com o alvo (Crepani, 1993).



Fonte: Florenzano (2011).

**Figura 3.** Interação da radiação eletromagnética entre o alvo e o sensor.

Cada alvo possui uma característica exclusiva de emissão e reflexão de energia eletromagnética. Esta energia medida pelos sensores é baseada na radiação de fótons, de modo que a energia eletromagnética é levada pelo espaço por meio de ondas eletromagnéticas contendo variados comprimentos, sendo que quanto maior sua frequência menor é o seu comprimento de onda (Heege, 2013).

Por meio de sensores ópticos que coletam os sinais eletromagnéticos, pode-se entender e identificar o objeto com o comportamento espectral (Novo, 1992).

A definição do SR está exposta a diferentes tipos de interpretação (Lorenzetti, 2015), tais como, o SR é “a medida das propriedades de um objeto na superfície da Terra usando dados adquiridos por meio de aeronaves e satélites” (Schowengerdt, 2007).

O SR pode ser definido pela utilização conjunta de equipamentos, sensores para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de espaçonaves, aeronaves, ou em outras plataformas, com intuito de estudar fenômenos, eventos e processos que acontecem na superfície da Terra a partir da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem e do registro (Novo, 2008).

O SR pertence a ciência que faz a classificação e identificação das características da superfície terrestre utilizando radiações eletromagnéticas como meio de interação (Navalgund, 2001).

O SR é a tecnologia que proporciona adquirir imagens, e outros tipos de dados, da superfície terrestre por intermédio da coleta e armazenamento da energia refletida ou emitida pela superfície, de modo que o termo sensoriamento refere-se à obtenção de dados por via de sensores acoplados em plataformas terrestres, aéreas (balões e aeronaves) e orbitais (satélites artificiais), e quanto ao termo remoto significa a distância sem que exista o contato físico entre o sensor e os objetos na superfície terrestre. E, além disso, o processamento, análise e a interpretação desses dados também fazem parte do SR sendo considerado como uma ciência (Florenzano, 2011; Jensen, 2009).

O SR é caracterizado por adquirir informação de um objeto sem que tenha um contato físico, podendo ser à longas distâncias. As primeiras medições realizadas por meio do SR foram feitas com a utilização de câmeras colocadas em foguetes, balões,

pássaros, pipas e aeronaves. Em dias atuais, as imagens dos sensores remotos são obtidas em vários tipos de plataforma, tais como, aeronaves, máquinas agrícolas autopropelidas, satélites, veículos aéreos não tripulados (VANTs), e dentre outras (Shiratsuchi et al., 2014).

O Sensoriamento Remoto é uma técnica que possuiu muitas vantagens, dentre elas: disponibilidade em locais de difícil acesso ou acidentados; cobertura de grandes áreas geográficas contendo observações isoladas pontuais; caráter multidisciplinar da informação produzida; coleta de dados não destrutiva; e ajuste de erros por intermédio da avaliação de séries históricas de imagens (Jensen, 1996).

O SR aplicado em plantas afetadas pelos estresses ambientais, tem grande potencial para manejo e avaliação sem causar danos a elas ou extensos procedimentos de coletas de amostras (Daughtry et al. 2000; Afanasyev et al. 2001). As informações avaliadas podem ser adquiridas efetivamente em tempo real e usadas para análise das características espectral da cultura e criando os índices de vegetação espectral (Demetriades-Shah et al. 1990). As determinações espectrais têm apresentado um potencial método rápido, não destrutivo e automático para avaliar os níveis de nutrientes das culturas e as variáveis dos estádios de crescimento da planta (Casanova et al. 1998; Diker e Bausch 2003; Hansen e Schjoerring, 2003). A técnica pode ajudar potencialmente no monitoramento dos parâmetros de crescimento como também nos níveis de nitrogênio da planta e a estratégia da fertilização, o que otimiza o uso de forma mais precisa do nitrogênio para a produção agrícola e minimiza as aplicações em grande quantidade da adubação nitrogenada causando riscos ambientais (Alt et al., 2000).

Outras aplicações do SR voltadas para a agricultura, segundo Brandão (2009) são: avaliação do estágio fenológico; produtividade a cultura; monitoramento do vigor e do estresse hídrico das plantas; e estimativa da biomassa.

Uma das primeiras aplicações de dados adquiridos remotamente foram por meio da identificação de diferenças na refletância, referentes à densidade da cobertura vegetal. Na área do SR a radiometria espectral se destaca por ser uma das mais relevantes, podendo ser feita no campo ou em laboratório, sendo que ela consegue detectar a intensidade com que cada material (vegetação, solo ou rocha)

reflete a radiação eletromagnética em distintas faixas do comprimento de onda (Brandão et al., 2008).

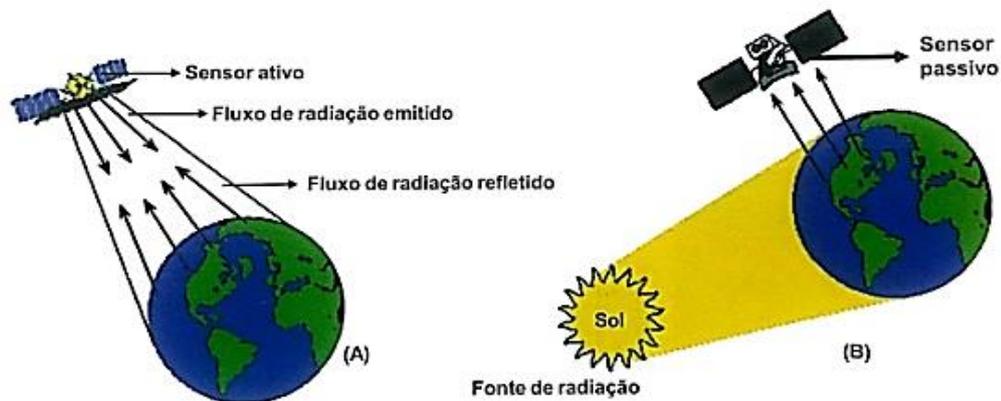
Para a utilização dos dados de SR de forma precisa é importante ter o conhecimento dos fatores que influenciam nas respostas espectrais dos objetos sensoriados, como interferências das geometrias de observação e de iluminação; como a radiação eletromagnética é coletada (bandas espectrais, sensores e plataformas); e a presença da atmosfera terrestre (Formaggio e Sanches, 2017).

### **Sensores de dossel**

Os sensores ópticos medem a forma como a radiação interage com os alvos, especialmente em relação à energia refletida, também são chamados de radiômetros e variam em virtude dos comprimentos de onda, plataforma e das faixas espectrais (Molin et al., 2015).

Os sistemas sensores podem ser classificados em sensores ativo ou passivo, quanto a fonte de energia, imageadores e não-imageadores (Novo, 2008).

Os sensores passivos são aqueles que obtêm dados por meio da radiação natural refletida ou emitida da superfície da Terra. Também é possível produzir ondas ou radiações eletromagnéticas específicas e iluminar a superfície terrestre. A interação da radiação com o alvo poderia ser pesquisada por meio da refletância dispersa pelo objeto. Já os sensores ativos produzem sua própria radiação (Figura 4). Uma câmera fotográfica que produz flash é considerada um sensor ativo, enquanto, a câmera que usa apenas a luz solar é sensor passivo. Os sensores passivos ou ativos pode ser em imagens ou não, como câmera e radiômetro de não-varredura, respectivamente. Os sensores também podem ser classificados de acordo com a faixa espectral que atua, como micro-ondas ou óptico (Navalgund, 2002).



Fonte: Moreira (2011).

**Figura 4.** Esquema de sensores ativos (A) e passivos (B).

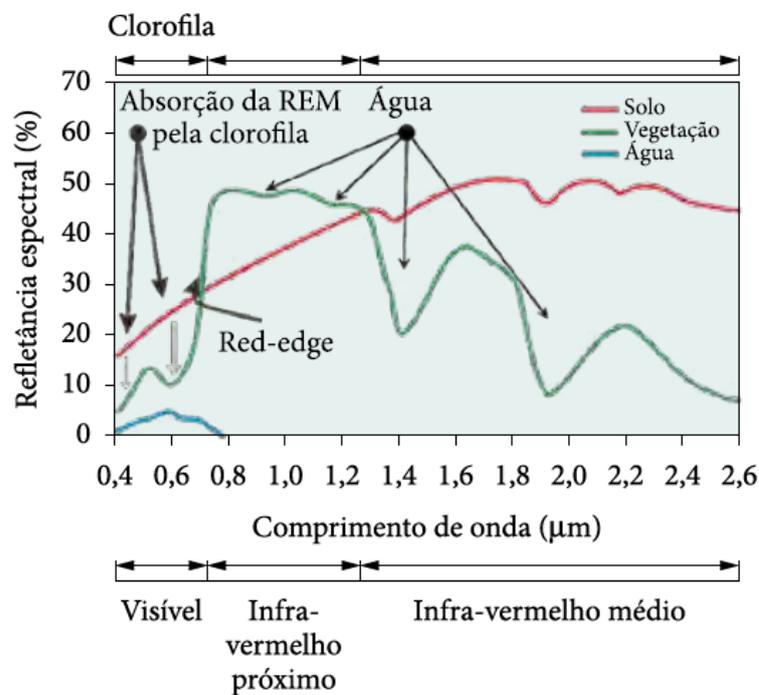
Quanto a plataforma em que os sensores ópticos e radiométricos trabalham normalmente em três níveis de coleta: terrestre, orbital e aéreo (suborbital) (Molin et al., 2015). Os sensores em nível aéreo destacam-se radiômetros hiperespectrais e fotografias aéreas; em nível orbital radiômetros do tipo escâner acoplados em satélites conhecidos como sensores imageadores; e em nível terrestre espectrorradiômetro e radiômetro portátil, podendo ser instalados em máquinas agrícolas (Moreira, 2011).

### Índices de vegetação

Os dados da refletância estão sendo associados com as características biofísicas da planta, como biomassa, fração radiativa interceptada fotossinteticamente, ou a área foliar. Na agricultura, as propriedades da refletância são melhores analisadas por meio de combinações matemáticas de distintas faixas espectrais (Atzberger, 2013). Essas combinações são feitas por meios dos índices de vegetação (IVs), que são medidas da atividade da vegetação, normalmente, usam nos comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e do visível (Shiratsuchi et al., 2014).

Para o entendimento como os índices de vegetação são criados é necessário maior compreensão da resposta espectral da vegetação por meio do comportamento da refletância (Shiratsuchi et al., 2014) das assinaturas espectrais, característica da composição do material em estudo, de alguns objetos presentes na superfície terrestre, tais como, vegetação, solos, rochas (Formaggio e Sanches, 2017) e água.

Figura 5 a observação e reconhecimento das assinaturas espectrais de alguns objetos, como solo, água e vegetação, são importantes para o uso do SR. O comportamento espectral da vegetação verde saudável, é influenciado pela clorofila, e reflete em toda a faixa da região do visível, sendo que as maiores absorções da luz são na faixa do vermelho (600 a 700 nm) e do azul (400 a 500 nm), enquanto o seu ápice é no comprimento de onda do verde (500 a 600 nm) (Brandão et al., 2008). Dependendo do tipo de cultura, a radiação solar na faixa do infravermelho próximo – NIR (750 a 1300 nm), é refletida entre 30 e 80% dos raios incidentes (Shiratsuchi et al., 2014).



Fonte: Shiratsuchi et al. (2014).

**Figura 5.** Assinatura espectral da água, solo e vegetação obtidos pela refletância dos espectros.

Os comprimentos de ondas maiores que 1300 nm ocorre a influência do conteúdo de água das folhas, havendo interação com a radiação, visto que, há absorção de água no tecido foliar acontece principalmente nos comprimentos de onda entre 1450 e 1950 nm, pois nestas regiões tem-se a determinação do conteúdo de água das folhas (Peñuelas et al., 1997).

Foram criados vários índices de vegetação com diversas finalidades. Pesquisadores de todo o mundo utilizam as características de absorção relacionadas

com os constituintes bioquímicos da planta avaliada. Na agricultura são usados diversos índices e são otimizados para analisar um processo de interesse (Brandão, 2009). Alguns índices foram sugeridos para capturar os processos fotoquímicos relacionados com a atividade da fotossíntese, como estimar o conteúdo de pigmentação da folha (clorofila) ou o uso da eficiência da luz (Daughtry et al., 2000; Brito et al., 2011), e outros para adquirir o índice de área foliar - IAF (Shiratsuchi et al., 2014).

A determinação dos índices de vegetação demonstra o potencial de produtividade de grãos utilizando variados sistemas de manejo que é uma relevante ferramenta para detectar os fatores limitantes e as estratégias adequadas de manejo da cultura (Villalba, 2012). A utilização dos índices de vegetação torna-se possível a determinação dos parâmetros agrônômicos, como teor de clorofila, índice de área foliar, biomassa verde, porcentagem de cobertura verde, e dentre outros (Jensen, 2009). O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que foi proposto por Rouse et al. (1974), é um indicador numérico baseado na diferença entre os comprimentos de onda da faixa infravermelho próximo e do vermelho divididos pela sua soma (Zerbato et al., 2016).

O NDVI apresenta correlação com a biomassa quando comparado com os outros índices de vegetação, sendo um bom indicador da biomassa quando na área tem-se boa cobertura vegetal (Meneses et al., 2012), como pode ser observado na cultura do amendoim os brotos promovem uma boa cobertura vegetal. Além disso, foi observado que o sensor GrenSeeker pode ser utilizado para cobertura vegetal, estimativa da produtividade e a população de plantas do amendoim (Zerbato et al., 2016).

### **Controle Estatístico de Qualidade**

Desde o início da Revolução Industrial, Walter Shewhart estudou a variabilidade dos processos (Costa; Epprecht e Carpinetti, 2005). Na década de 1920 nos Estados Unidos, Shewhart colocou em prática nas fábricas alguns conceitos básicos em Metodologia Científica e Estatística. Ele foi empreendedor e o precursor da área de Controle Estatístico de Qualidade (CEQ), sendo muito usado a nível

mundial nas fábricas, pois pelo menos uma das ferramentas de CEQ são usadas nas mesmas para a melhoria dos processos industriais (Samohyl, 2009).

A qualidade tornou-se um dos mais relevantes fatores de decisão dos consumidores na seleção de serviços e produtos. A qualidade de um produto pode ser avaliada e descrita de muitas formas (Montgomery, 2016). Garvin (1987) citou oito componentes ou dimensões da qualidade, como conformidade com especificações, desempenho, características, confiabilidade, durabilidade, estética, assistência técnica, e qualidade percebida. De acordo com Montgomery (2016) variabilidade é inversamente proporcional à qualidade, ou seja, para a melhoria da qualidade tem que reduzir a variabilidade nos produtos e processos.

De acordo com Sherwhart todo e qualquer processo por mais bem controlado e projetado que seja tem variabilidade (Costa; Epprecht e Carpinetti, 2005), de modo que, as variabilidades podem ser provenientes de causas aleatórias ou natural, e por causas especiais.

Causas naturais são aquelas que são inerentes ao processo, são fatores que não se pode controlar, pensando na agricultura, pode-se citar, como vento, temperatura, chuva, umidade do ar. Quanto as causas especiais, são fatores ligados a problemas ou erros que podem ocorrer durante as operações agrícolas, tais como, regulagem inadequada de máquinas, habilidade do operador, quebra de alguma peça na máquina, monitoramento do teor de água no grão da cultura, entre outros, sendo que estes problemas quando detectados devem ser corrigidos ou solucionados o mais rápido possível por meio do monitoramento das operações.

Empresas estão sendo obrigadas a buscar maior eficiência operacional e administrativa devido à concorrência a nível mundial. Técnicas do Controle Estatístico de Processo (CEP) são uma das ferramentas que possibilitam a melhoria da produtividade e qualidade nas empresas. Diante disso, o CEP é largamente utilizado nas indústrias e tem apresentado grande potencial de seu uso na agropecuária (Milan e Fernandes, 2002). O CEP é uma das ferramentas mais empregadas do CEQ, por meio de cartas de controle.

O Controle Estatístico de Qualidade (CEQ) tem indicado na área de Ciências Agrárias uma promissora ferramenta para o monitoramento da qualidade das operações agrícolas, por isso foi aplicado neste trabalho uma ferramenta do CEQ,

conhecida como Controle Estatístico de Processo (CEP), mais especificamente a utilização de cartas de controle. Estas análises estatísticas podem ser encontradas em diversos trabalhos, tais como, colheita mecanizada Voltarelli et al. (2015) em cana-de-açúcar, Chioderoli et al. (2012) e Toledo et al. (2008) em soja; Carneiro et al. (2017) adubação mecanizada em cana-de-açúcar; Tavares et al. (2015) recolhimento mecanizado no café, e dentre outros trabalhos.

Na área da AP de acordo com os trabalhos bibliográficos levantados este tipo de análise estatística não foi encontrado. Assim, neste trabalho usou-se este tipo de análise estatística demonstrando um grande potencial para a visualização e detecção do comportamento de cada índice de vegetação em estudo (NDVI, NDRE e IRVI) ao longo dos estádios de crescimento das culturas de amendoim e soja, partindo do pressuposto, que isto foi um dos objetivos da Tese.

O CEP é uma ferramenta estatística, que proporciona a obtenção de resultados mais precisos na identificação de falhas por intermédio das possíveis causas especiais e precauções que devesse tomar durante as operações para a diminuição dos erros, e possibilita menor perda de insumos, produtos, matéria-prima, entre outros; aumenta a produtividade da empresa ou do produtor agrícola (Ignácio, 2010).

Nas cartas de controle de Shewhart é composta pelos limites de controle superior (LSC) e inferior (LIC), que são obtidos por meio de uma análise estatística, e, esta por sua vez é baseada conforme a variabilidade do processo. Estes limites identificam se há variação dos resultados em virtude das causas especiais (causas não controladas no processo) e são calculados baseados no desvio-padrão das variáveis (Noronha et al., 2011).

$$\text{LIC} = \bar{X} - 3.\sigma \quad (1)$$

$$\text{LSC} = \bar{X} + 3.\sigma$$

Em que:

LIC: Limite Inferior de Controle (quando o valor for abaixo de zero foi considerado como nulo);

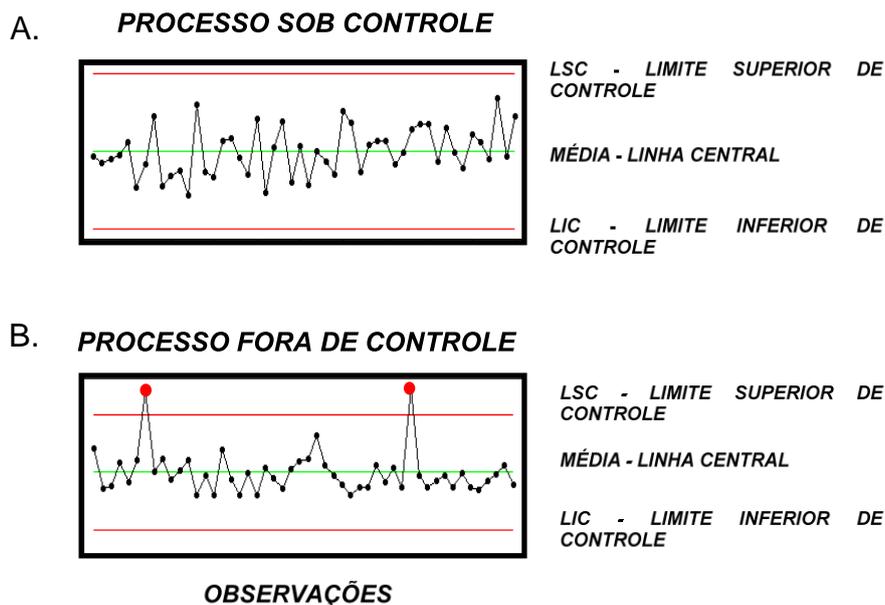
LSC: Limite Superior de Controle;

$\bar{X}$  : média geral da variável;

$\sigma$ : desvio-padrão.

Quando o processo está sob controle, apenas há influência das causas aleatórias, havendo variabilidade natural nos valores. Contudo, quando o processo está fora de controle ocorre atuação no processo, principalmente, por causas especiais e também há influência de causas aleatórias (variabilidade natural) (Costa, Epprecht e Carpinetti, 2005).

Quando há interferência de causas especiais nas cartas de controle, o ponto é destacado na carta de controle, mostrando que no processo possui causa especial e que deve ser investigada. Contudo, quando nenhum ponto é destacado (Figura 6), significa dizer que o processo está sob controle estatístico não tendo a presença de causas especiais (Noronha et al., 2011).



Fonte: Bertonha (2011).

**Figura 6.** Cartas de controle com o processo sob controle estatístico (A) e processo instável com a presença de causas especiais (B).

A carta de controle de Shewhart de certa forma é um teste de hipótese, sendo que os pontos fora de controle são estimados pela hipótese alternativa, e o processo sob controle por meio da hipótese nula. Nas cartas de controle com instabilidade é recomendado a utilização de gráficos sequências, como *run charts*, pois é possível

realizar uma análise com mais detalhes para verificar o comportamento dos dados, se estão sendo influenciados ou não pelos padrões aleatórios (Nomelini et al., 2009).

Como foi observado por Milan e Fernandes (2002), avaliando o uso do controle de qualidade nas operações do preparo do solo para a cultura do milho por meio do CEP, verificaram que o controle das operações agrícolas proporcionou a redução da variabilidade, alcançando resultados próximos aos estipulados pelo corpo técnico.

## REFERÊNCIAS

Afanasyev YD, Nezlin NP, Kostianoy AG (2001) Patterns of seasonal dynamics of remotely sensed chlorophyll and physical environment in the Newfoundland region. **Remote Sensing of Environment** 76: 268–282.

Alt C, Stützel H, Kage H (2000) Modeling nitrogen content and distribution in cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis). **Annals of Botany** 86: 963–973.

Atzberger C (2013) Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing** 5: 949-981.

Brandão ZN, Bezerra MVC, Freire EC, Silva BB (2008) Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: Azevêdo DMP, Beltrão NEM **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 1309 p. cap. 20. v. 2.

Brandão ZN (2009) **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Brito GG, Sofiatti V, Brandão ZN, Silva VB, Silva FM, Silva DA (2011) Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in cotton plants. **Acta Scientiarum. Agronomy** 33: 671-678.

Carneiro FM, Furlani CEA, Gírio LAS; SILVA RP, Malheiros EB (2017) Mechanized and individualized application of N-P-K in combined operations in sugarcane. **Engenharia Agrícola** 37: 676-688.

Casanova D, Epema GF, Goudriaan J (1998) Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. **Field Crops Research** 55: 83–92.

Chioderoli CA, Silva RP, Noronha RHF, Cassia MT, Santos EP (2012) Perdas de grãos e distribuição de palha na colheita mecanizada de soja. **Bragantia** 71: 112-121.

Costa AFB, Epprecht EK, Carpinetti LCR (2005) **Controle Estatístico de Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 335 p.

Crepani E (1993) **Princípios básicos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: CNPq/INPE, 45p.

Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, Colstoun EB, McMurtrey JE (2000) Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment** 74: 229-239.

Demetriades-Shah TH, Steven MD, Clark JA (1990) High resolution derivative spectra in remote sensing. **Remote Sensing of Environment** 33: 55–64.

Diker K, Bausch WC (2003) Potential use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. **Biosystems Engineering** 85: 437–447.

Epiphany JCN (2017) Apresentação. In: Formaggio AR, Sanches IDel'Arco. **Sensoriamento Remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 284p.

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sustainable food and agriculture. 2015. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 30 maio 2018.

Florenzano TG (2011) **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3 ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 128p.

Foley JA, Ramankutty N, et al. (2011) Solutions for a cultivated Planet. **Nature** 478: 337-342.

Formaggio AG, Moura V, Epiphany JCN, Silva HR, Fiorio PR, Campos RC (2003) Dados TM/Landsat na estimativa de áreas destinadas a culturas de verão, no estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte, MG. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.93-100.

Formaggio AR, Sanches IDel'A (2017) **Sensoriamento Remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 284p.

Garvin DA (1987) Competing in the Eight Dimensions of quality. **Harvard Business Review**, 87(6):101-109.

Ignácio AS (2010) **Importância da estatística para o processo de conhecimento e tomada de decisão**. Curitiba: IPARDES, 17p. (Nota Técnica, 6). Disponível em: <[http://www.ipardes.pr.gov.br/biblioteca/docs/NT\\_06\\_importancia\\_estatistica\\_tomada\\_decisao.pdf](http://www.ipardes.pr.gov.br/biblioteca/docs/NT_06_importancia_estatistica_tomada_decisao.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2018.

Hansen PM, Schjoerring JK (2003) Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment** 86: 542–553.

Heege HJ (2013) **Precision in crop farming**. London: Springer, 300p.

Jensen JR (1996) **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 316 p.

Jensen JR (2009) **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 598p.

Lorenzetti JA (2015) **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 293p.

Macdonald RB, Hall FG, Erb RB (1975) **The use of Landsat data in a large area crop inventory experiment (LACIE)**. West Lafayette: LARS Symposia. (paper 46). Disponível em: <[http://docs.lib.purdue.edu/lars\\_symp/46](http://docs.lib.purdue.edu/lars_symp/46)>. Acesso em: 02 jun. 2018.

Meneses PR, Almeida T, Rosa ANCS, Sano EE, Souza EB, Baptista GMM, Brites RS (2012) **Introduction to processing of remote sensing images**. Brasília: UnB, pp. 266.

Milan M, Fernandes RAT (2002) Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agricola**, 59(2):261-266.

Mobley CD (1994) **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 592p.

Molin JP, Amaral LR, Colaço AF (2015) **Agricultura de precisão**. Oficina de Textos: São Paulo, p. 119-153.

Moreira MA (2011) **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. Viçosa: UFV, 422p.

Montgomery DC (2016) **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 549p.

Narvaez FY, Reina G, Torres-Torriti M, Kantor G, Cheein FA (2017) A Survey of Ranging and Imaging Techniques for Precision Agriculture Phenotyping. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics** 22: 2428-2439.

Navalgund RR (2001) Remote Sensing: Basics and Applications. **Resonance**, p.51-60. 2001. Disponível em: <<https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/006/12/0051-0060>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

Navalgund RR (2002) Remote Sensing: Sensors and Platforms. **Resonance**, p.37-46. 2002. Disponível em: <<http://repository.ias.ac.in/89371/1/50P.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

Nomelini QSS, Ferreira EB, Oliveira MS (2009) Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle de Shewhart: um enfoque probabilístico. **Gestão & Produção**, 16: 414-421.

Noronha RHF, Silva RP, Chioderoli CA, Santos EP, Cassia MT (2011) Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada diurna e noturna de cana-de-açúcar. **Bragantia**, 70(4): 931-938.

Novo EMLM (1992) **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 208p.

Novo EMLM (2008) **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Ed. Blucher, 363p.

Peñuelas J, Piñol J, Ogaya R, Filella I (1997) Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, 18: 2869-2875.

Plant RE (2001) Site-specific management: the application of information technology to crop production. **Computers and Electronics in Agriculture** 30: 9-29.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt, MD, pp 371.

Samohyl RW (2009) **Controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 352p.

Shiratsuchi LS, Brandão ZN, Vicente LE, Victoria DC, Ducati JR, Oliveira RP, Vilela MF (2014) Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: Bernardi ACC, Naime JM, Resende AV, Bassoi LH, Inamasu RY (2014) **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: EMBRAPA, 2014. Cap. 4. p.58-73.

Schowengerdt, RA (2007) **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3. ed. Burlington, MA: Academic Press, 515p.

Tavares TO, Santinato F, Silva RP, Voltarelli MA, Paixão CSS, Santinato R (2015) Qualidade do recolhimento mecanizado do café. **Coffee Science** 10: 455-463.

The Royal Society. **Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture**. Disponível em: <<http://royalsociety.org/Reapingthebenefits>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

Toledo A, Tabile RA, Silva RP, Furlani CEA, Magalhães SC, Costa BO (2008) Caracterização das perdas e distribuição de cobertura vegetal em colheita mecanizada de soja. **Engenharia Agrícola** 28: 710-719.

Villalba EOH (2012) **Nutritional status of corn evaluated by optical spectroscopy in Paraguay**. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering). Universidade Federal de Santa Maria, pp 132.

Voltarelli MA, Silva RP, Cassia MT, Ortiz DF, Torres LS (2015) Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar utilizando-se de três modelos de facas. **Engenharia Agrícola** 35: 528-541.

Zerbato C, Rosalen DL, Furlani CEA, Deghaid J, Voltarelli MA (2016) Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science** 10:758-764.

## **CAPÍTULO 2 – Correlação entre índices de vegetação e características de amendoim em múltiplos estádios de desenvolvimento**

**RESUMO** - Os sensores ópticos ativos têm sido muito utilizados para o monitoramento espaço-temporal da cultura, por serem métodos não destrutivos, pela obtenção de dados rápidos e pela sua acurácia. Objetivou-se determinar em qual estágio de desenvolvimento da cultura obtêm-se o tempo ótimo de coleta das leituras dos sensores por meio das melhores correlações entre os indicadores de qualidade (índices de vegetação x biomassa fresca e seca, largura de dossel, índice de clorofila, produtividade e maturação). Além disso, comparar os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) por meio do monitoramento da variabilidade temporal na cultura do amendoim, determinando qual deles obteve as melhores qualidades de leitura ao longo do processo. O experimento foi realizado na safra de 2016/17 em área agrícola do município de Dumont, estado São Paulo, Brasil. O delineamento experimental foi baseado nas premissas básicas do Controle Estatístico de Qualidade – CEQ contendo 63 pontos amostrais com GRID 30 x 30 m. Os parâmetros foram avaliados aos 30, 45, 60, 75 e 119 dias após a semeadura (DAS) por meio do sensoriamento proximal, utilizando os sensores GreenSeeker e OptRX. As análises estatísticas utilizadas foram o coeficiente de correlação de Pearson, estatística descritiva e as cartas de controle. Aos 45 e 60 DAS foi considerado o tempo ótimo para o monitoramento da variabilidade da cultura do amendoim, pois obteve as melhores correlações entre os indicadores de qualidade. Para o monitoramento temporal da cultura por meio das cartas de controle, o NDRE obteve as melhores qualidades de leitura ao longo do processo comparado ao NDVI e IRVI.

**Palavras-chaves:** sensoriamento remoto; *Arachis hypogaea* L.; cartas de controle; agricultura de precisão;

### **Correlation between vegetation indices and peanut traits at multiple crop development stages**

**ABSTRACT** - Active optical sensors have been widely used for spatial and temporal monitoring of peanut culture because they are nondestructive methods used for obtaining data quickly and for their accuracy. The objective of this study was to determine which stage of crop growth is the optimal time for collecting sensor readings, and this was obtained through the best correlations between the quality indicators (vegetation indexes, fresh and dry biomass, canopy width, chlorophyll index, productivity, and maturation). In addition, we compared vegetation indexes (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI, Normalized Difference Red-Edge Index - NDRE, and Inverse Ratio Vegetation Index - IRVI) by monitoring temporal variability in the peanut crop, determining which of them obtained the best reading qualities throughout the process. The experiment was performed on the 2016/17 crop in the agricultural area of the municipality of Dumont, in the state of São Paulo, Brazil. The experimental design was based on the basic assumptions of the Statistical Quality Control – CEQ, containing 63 sample points with GRID 30 x 30 m. The parameters were evaluated at 30, 45, 60, 75, and 119 days after sowing (DAS) by means of proximal sensing using the GreenSeeker and OptRX sensors. The statistical analyses

used were the Pearson correlation coefficient, descriptive statistics, and control charts. At 45 and 60 DAS, it was considered the optimal time for the monitoring of peanut crop variability because it obtained the best correlations among the quality indicators. For the spatio-temporal monitoring of the culture through control charts, the NDRE obtained the best reading qualities throughout the process compared with NDVI and IRVI.

**Keywords:** remote sensing; *Arachis hypogaea* L.; control charts; precision agriculture

## Introdução

O amendoim é considerado dentre as leguminosas uma das mais importantes, não só pela sua expressão econômica como também nutricionalmente. E ainda, é muito utilizado na rotação e sucessão de cultura, principalmente, em área de reforma de canavial e pastagem, por ser de ciclo curto e suas operações serem totalmente mecanizadas (Grotta et al., 2008).

Devido à importância econômica dessa cultura é de relevância o aumento da produtividade, que pode ser obtida por meio da utilização de técnicas e métodos modernos que permitam o maior conhecimento da lavoura e da cultura, proporcionando monitoramento temporal precisos. De acordo com Grohs et al. (2009), dentro de uma lavoura têm-se áreas com diferentes potenciais de produtividade e que precisam de manejos distintos.

Em função do crescimento populacional a produção agrícola deve dobrar até 2050 para atender a demanda de alimentos. Agricultura de Precisão (AP) é a chave para melhorar a eficiência e a produtividade no uso dos recursos, com intuito de ajudar a alcançar essa meta sob várias limitações encontrados na agricultura, tais como, degradação do solo, aumento dos custos, mudanças climáticas, pouca mão-de-obra, e disponibilidade de terras cultiváveis. Para superar esses desafios, a Agricultura de Precisão desenvolve e usa metodologias de detecção para fornecer informação sobre os indicadores da saúde da cultura e o seu estágio de desenvolvimento (Narvaez et al., 2017).

Na agricultura de precisão, a área que tem demonstrado maior potencialidade para desenvolvimento é a de sensores, tanto em aplicações quanto equipamentos. Sendo que, os sensores ópticos conseguem identificar as regiões da lavoura que proporcionam melhor desenvolvimento/vigor (Molin et al., 2015).

Por meio dos sensores ativos de dossel obtêm-se os índices de vegetação, tais como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDRE (Normalized Difference Red Edge), GNDVI (Green NDVI), IRVI (Inverse Ratio Vegetation Index) entre outros. Segundo Motomiya et al. (2014) os índices de vegetação são ferramentas promissoras, que têm sido usadas e melhoradas para o monitoramento das culturas agrícolas.

Técnicas do sensoriamento remoto aparecem como instrumento de elevado potencial, tanto no processamento quanto na coleta de dados em áreas agrícolas. Esses dados podem ser obtidos por radiometria de campo, fotografias aéreas e imagens de satélite, podendo fornecer com precisão informações da variabilidade do campo (Motomiya et al. 2012). De acordo com Amaral et al. (2015a) pode-se encontrar muitos sensores ópticos ativos, porém têm-se poucas pesquisas que comparam a eficiência desses equipamentos determinando os parâmetros da cultura.

Diante ao exposto, justifica-se o desenvolvimento deste trabalho por ser tema de atual relevância na área acadêmica na cultura do amendoim, por utilizar diferentes índices de vegetação por meio dos sensores ativos ou de dossel para o monitoramento das plantas ao longo do seu desenvolvimento e por proporciona maior precisão na coleta dos dados.

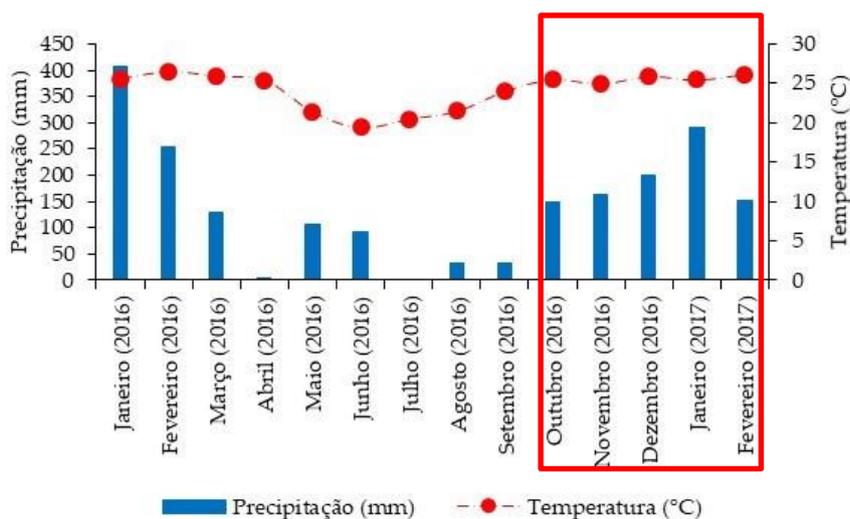
Portanto, objetivou-se avaliar a correlação entre os indicadores de qualidade da cultura do amendoim e os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) aos 30, 45, 60, 75 e 119 DAS (dias após a semeadura). Além disso, comparar as leituras dos índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) por meio do monitoramento da variabilidade temporal na cultura do amendoim, observando qual deles obteve as melhores qualidades de leitura ao longo do processo.

## Material e Métodos

### Descrição da área experimental

O estudo da variabilidade temporal dos índices de vegetação na cultura do amendoim foi realizado na safra de 2016/17 em área agrícola do município de Dumont localizada próximo às coordenadas 21°15'S e 47°58'W, estado São Paulo, Brasil.

O solo da área experimental possui textura argilosa sendo classificado como Latossolo Vermelho de acordo com Embrapa (2013). Quanto ao clima desta região é Aw, isto é, tropical com inverno seco, de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). Os dados pluviométricos da área experimental são apresentados na Figura 1, sendo que o período de condução do experimento foi realizado de outubro de 2016 a fevereiro de 2017.



Fonte: Fazenda Resfriado (precipitação) e The Weather Company (temperatura) (<https://www.wunderground.com/history/>).

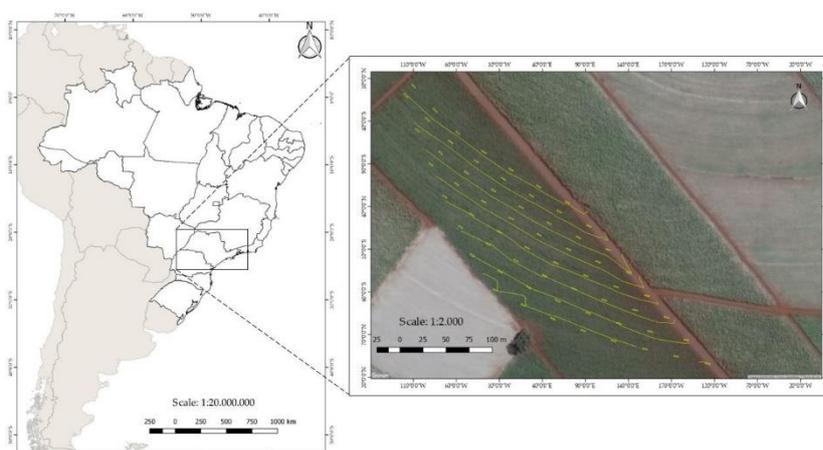
**Figura 1.** Dados pluviométricos de Dumont durante a condução do experimento de outubro de 2016 a fevereiro de 2017, que está em destaque, estado de São Paulo, Brasil.

De acordo com o levantamento das condições climáticas, para o mês de janeiro de 2017, realizado pela CONAB/INMET (2017a) os volumes de precipitação variaram entre 150 e 400 mm na região sudeste, em São Paulo, centro-sul de Minas Gerais e no Rio de Janeiro, resultando em acumulados acima da média ou próximos. Em dezembro de 2016 o acúmulo de chuva ficou abaixo da média, no entanto, a

regularidade, distribuição especial e intensidade das precipitações foram favoráveis para o desenvolvimento das lavouras (Conab/Inmet, 2017b). Apesar do amendoim ser considerado planta relativamente resistente à seca (Nakagawa e Rosolem, 2011). De acordo com Savy e Canecchio Filho (1796) em cultivares precoces, com ciclo entre 90 a 110 dias, consideram que 600 a 800 mm de precipitação por ano são suficientes para produção do amendoim em condições brasileiras. Assim, foi observado na Figura 1 que os dados pluviométricos para o amendoim foram adequados para o desenvolvimento da cultura.

### Delimitação experimental

O delineamento experimental foi baseado no Controle Estatístico de Qualidade – CEQ (Montgomery, 2009) contendo 63 pontos amostrais com malha 30 x 30 m (Figura 2). Foi avaliado aos 30, 45, 60, 75 e 119 dias após a semeadura (DAS) por meio do sensoriamento proximal o comportamento dos indicadores de qualidade, que foram biomassa fresca e seca, largura do dossel, índice de clorofila, maturação, produtividade e os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI).



**Figura 2.** Localização da área experimental no município de Dumont, estado São Paulo, Brasil.

Cada ponto amostral foi composto por duas linhas com 5 metros de comprimento com 0,90 m de espaçamento entre linhas, perfazendo 9 m<sup>2</sup> de área útil por ponto. Todas as avaliações foram realizadas em todos os pontos ou parcelas monitorando a variabilidade espaço-temporal da cultura do amendoim.

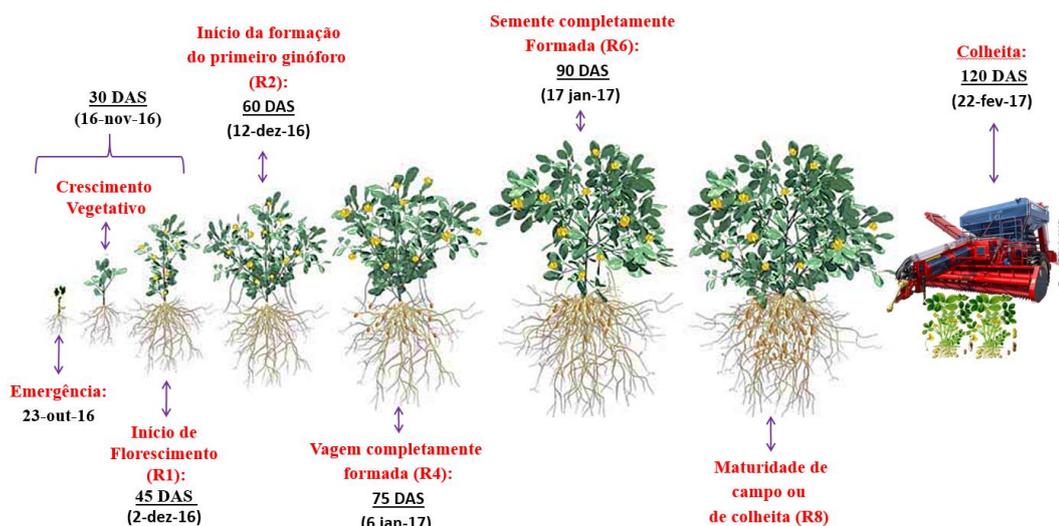
Os 63 pontos amostrais foram georreferenciados com o receptor GNSS Trimble R6, possuindo sistema GNSS com antena de alta precisão, e com sinal de correção RTK - Real Time Kinematic (Trimble, 2013; Embratop, 2017).

### **Equipamentos agrícolas**

Os equipamentos utilizados durante a semeadura foram uma semeadora Jumil, modelo Exacta 2980 PD pantográfica, com espaçamento entre linhas de 0,90 m e densidade de semeadura 22 sementes  $m^{-1}$  da cultivar Granoleico, que foi acoplada no trator John Deere, modelo 7195J com 195 cv, motor com sistema FieldCruise e com injeção eletrônica (Minas Verde John Deere, 2016). Quanto à adubação foi realizada na semeadura com 220  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 05-37-00, e aos 35 dias após a semeadura foi efetuado a de cobertura com 100  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 00-00-60. No dia da semeadura a umidade do solo estava a 14,8% na camada 0-20 cm.

### **Sensores de reflectância de dossel**

As avaliações do sensoriamento remoto foram realizadas utilizando os sensores ópticos ativos GreenSeeker e OptRX. Por meio da Figura 3 observam-se os períodos avaliados em relação aos estádios de crescimentos do amendoim. As leituras dos índices de vegetação foram realizadas sobre o dossel da planta com os sensores (Grohs et al., 2011) mantendo o mesmo horário de coleta dos índices de vegetação, no período da manhã entre 8h00 às 12h00. Para os parâmetros produtividade e maturação foram realizados, apenas uma avaliação, após o arranquio do amendoim. Aos 119 DAS foi coletado somente os índices de vegetação (NDVI, IRVI e NDRE), pois esta avaliação foi realizada um dia anterior ao arranquio do amendoim (120 DAS).



Fonte: Rural Liquid Fertilisers - RLF Global (2017), adaptado de Carneiro F. M. (2018).

**Figura 3.** Estádio de desenvolvimento do amendoim com as datas de avaliações.

O GreenSeeker é um sensor óptico ativo, da marca Trimble®, modelo 500, com frequência de leitura entre 1 e 2 s. Este sensor emite luz eletromagnética com comprimento de onda na banda do vermelho (660 nm) e do infravermelho próximo – NIR (770nm), essa luz refletida pela planta é captada pelo sensor. Com a coleta da refletância, o sensor calcula automaticamente o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (Motomiya et al., 2014; Amaral et al., 2015a). O outro índice que também foi obtido juntamente com o NDVI foi o Inverse Ratio Vegetation Index –IRVI, ainda pouco utilizado em pesquisas.

Além disso, esse sensor possui coletor de dados da marca Trimble®, modelo Nomad, que é considerado computador portátil, que coleta e armazena os dados obtidos por meio do sensor óptico ativo (GreenSeeker), e que pode ser integrado com o software Farm Works Mobile (GeoAgri, 2012; 30. Trimble, 2016). O campo de visão do sensor é por volta de  $0,61 \pm 0,10$  m x  $0,15 \pm 0,05$  m (NTech Industries, 2008).

Para uma leitura mais precisa, o fabricante recomenda que a altura de trabalho deste sensor fique entre 0,6 a 1,2 m de distância em relação ao alvo, neste caso a planta. As leituras do sensor foram mantidas na altura de trabalho entre 0,6 e 0,7 m.

O OptRX é um sensor óptico ativo da marca Ag Leader, modelo ACS430, com frequência de leitura de 5 Hz (5 leituras por segundo), a altura de leitura foi acima do dossel da planta entre 0,60 e 0,70 m, com faixa de leitura imageada (0,36 a 0,42 m)

de 60% da altura de leitura, foi utilizado dois sensores que fizeram a média de leitura em tempo real.

Segundo o fabricante (Ag Leader), nos Estados Unidos, onde o OptRx foi criado, normalmente é feito em tempo real as leituras dos índices de vegetação em conjunto às aplicações de produtos, com sensor instalado em pulverizador possibilitando a realização simultânea entre essas operações.

Além disso, a empresa Ag Leader Technology (Ag Leader Technology, 2011) menciona que o sensor emite uma luz própria e mede a reflectância de algumas ondas eletromagnéticas específicas, e essa luz medida se correlaciona com o teor de clorofila e a biomassa, permitindo ao sensor obter o índice de vegetação. Com esse sensor é possível obter os índices de vegetação NDRE e NDVI. Porém, neste experimento foi escolhido o NDRE, pois o NDVI foi coletado com o equipamento GreenSeeker.

O Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) confeccionou suporte para o transporte do sensor OptRx (Figura 4), para os experimentos a campo, possibilitando o acompanhamento de todo o ciclo fenológico da cultura, desde a semeadura até antes da colheita. Esse suporte levou em conta o modelo desenvolvido pela Professora Doutora Brenda V. Ortiz, da Universidade de Auburn (Alabama, EUA). A pesquisa utilizou uma bicicleta como suporte, proporcionando o transporte de dois sensores ópticos ativos (GreenSeeker® e Crop Circle®) para suas avaliações realizadas a campo (Carneiro et al., 2017).



**Figura 4.** Bicicleta com suporte confeccionado pelo LAMMA, que foi utilizado para o transporte do sensor OptRx durante a coleta dos dados a campo.

## Índices de vegetação espectral

Neste trabalho o NDVI foi obtido pelo sensor GreenSeeker (Figura 5a), que emite e coleta a refletância das ondas eletromagnéticas (Figura 5b) do infravermelho próximo (near infrared) – NIR (774 nm) e vermelho (656 nm) sobre a planta, obtendo esse índice de vegetação por meio da Equação 1, de acordo com Sharma et al. (2011) e Rouse et al. (1973):

$$\text{NDVI} = \frac{F_{\text{NIR}} - F_{\text{Red}}}{F_{\text{NIR}} + F_{\text{Red}}} \quad (1)$$

Em que:

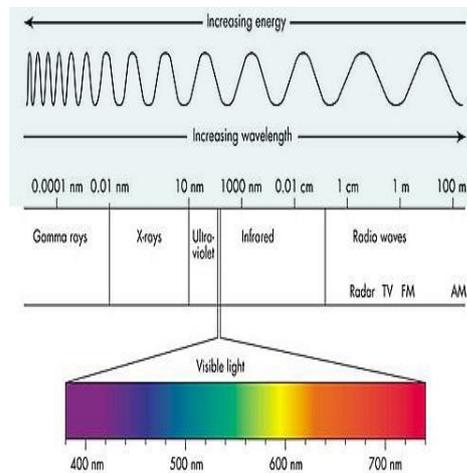
NDVI: Normalized Differential Vegetation Index;

$F_{\text{NIR}}$ : frações de emissão de infravermelho próximo (774 nm);

$F_{\text{Red}}$ : frações de emissão vermelho (656 nm).



(a)



(b)

Fonte:  
<http://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/emspect.htm>

**Figura 5.** Utilização do sensor GreenSeeker para o monitoramento da variabilidade espaço-temporal no amendoim (a) e o posicionamento das bandas espectrais (b).

O NDRE foi obtido pelo OptRx, um sensor óptico ativo, que emite e coleta a refletância das ondas eletromagnéticas, especificamente, nas bandas 790 e 720 nm, que proporcionou o cálculo desse índice por meio da Equação 2, segundo Fitzgerald et al. (2006).

$$\text{NDRE} = \frac{790\text{nm} - 720\text{nm}}{790\text{nm} + 720\text{nm}} \quad (2)$$

Em que:

NDRE: Normalized Difference Red Edge;

790 nm e 720 nm: bandas eletromagnéticas

O IRVI também foi adquirido pelo sensor GreenSeeker por meio das bandas 650 e 770 nm, cujo o cálculo desse índice de vegetação é apresentado pela Equação 3 (Kapp Júnior et al., 2016).

$$\text{IRVI} = \frac{650\text{nm}}{770\text{nm}} \quad (3)$$

Em que:

R<sub>650</sub>: Red (vermelho)

R<sub>770</sub>: NIR (infravermelho próximo)

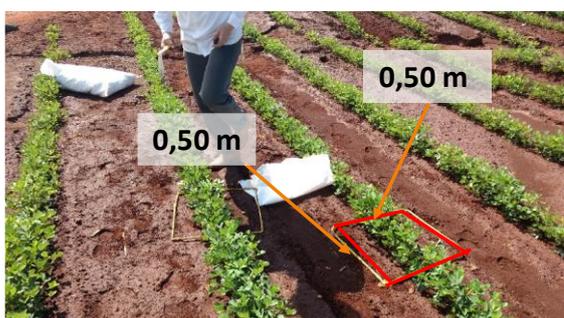
### **Indicadores de qualidade**

Os parâmetros avaliados foram feitos da seguinte forma.

- Os índices de vegetação foram adquiridos por meio dos sensores GreenSeeker e OptRX, obtendo NDVI, IRVI e NDRE.
- Biomassa fresca (*“in natura”*) e seca da parte aérea: foram coletadas por meio de uma armação com dimensão de 0,25 m<sup>2</sup> (0,5 x 0,5 m), perfazendo 0,5 m<sup>2</sup>, nas duas linhas avaliadas, isto é, cada linha do ponto amostral possuiu 5 m de comprimento, que pode ser observado na Figura 6a. Após colocar as armações em cada uma das duas linhas do ponto amostral, cortou-se a planta rente ao solo com auxílio de uma faca, aproveitando apenas a parte aérea do amendoim, as raízes foram

descartadas. As plantas coletadas foram colocadas em sacos de papel, posteriormente, suas massas foram aferidas, obtendo a massa úmida (biomassa fresca – Figura 6a), posteriormente, as amostras foram colocadas em uma estufa com circulação na temperatura de 65°C por 72 h (Gobbi et al., 2009; Grohs et al., 2009) para a obtenção da massa seca. Por fim, as amostras secas tiveram suas massas aferidas por meio de uma balança semi-analítica (modelo BL 3200H) obtendo a massa seca (biomassa seca – Figura 6b).

Biomassa Fresca (a)



Biomassa Seca (b)



**Figura 6.** Coleta de biomassa fresca (a) e seca (b) por ponto amostral.

- O índice de clorofila foi obtido por meio do clorofilômetro da marca Marcone®, modelo CCM-200 plus; com precisão de  $\pm 1$  unidade CCI (Índice de Conteúdo de Clorofila). As leituras foram realizadas coletando aleatoriamente 3 folhas por parcela, sendo que, a cada folha fez-se 3 leituras, visando a maior precisão.

- Largura do dossel e altura das plantas foram realizadas utilizando uma trena graduada em centímetros. A altura de plantas foi medida em relação ao nível do solo até o ponto mais alto da planta, e a largura do dossel mediu-se de uma extremidade a outra da planta.

- Produtividade do amendoim foi realizada com a armação com área de 2 m<sup>2</sup> onde foram coletadas todas as plantas em sacos de rafia, sendo posteriormente levadas para serem trilhadas despincando manualmente, obtendo as vagens, no qual suas massas foram aferidas e os dados foram transformados kg ha<sup>-1</sup>. O teor de água do grão foi corrigido para 8%.

- A maturação das vagens foi determinada por meio do método Hull scrape, no qual, realiza a raspagem do exocarpo das vagens, deixando exposta a

coloração do mesocarpo. A classificação das vagens foi realizada pelas cores conforme a Tabela de Classificação de Maturação do Amendoim, que foi desenvolvida pela Universidade da Georgia, EUA (Williams e Drexler., 1981). Foi coletado 100 vagens aleatórias por ponto amostral, em que foi determinando a maturação conforme o método Hull scrape, utilizando-se as classes laranja, preta e marrom para determinar a porcentagem de maturação da área (Santos et al., 2013).

### **Análises estatísticas**

Os indicadores de qualidade foram analisados por meio do Controle Estatístico de Qualidade, utilizando as cartas de controle de valores individuais que é uma das ferramentas do Controle Estatístico de Processo (CEP) mais utilizado entre os pesquisadores, por permitirem o monitorando do comportamento dos dados ao longo do tempo.

As cartas de controles de valores individuais são compostas pela média aritmética da amostra e pelos limites de controle superior (LSC) e inferior (LIC), obtidos pela média e desvio-padrão dos valores analisados por parâmetro, sendo  $LIC = \text{média} - 3 \text{ vezes o desvio padrão}$  e  $LSC = \text{média} + 3 \text{ vezes o desvio padrão}$  (Toledo et al., 2008). Em uma distribuição normal 99,7% das observações estão dentro de + ou - 3 desvios padrão da média (Minitab 18, 2017).

As análises descritivas são técnicas gráficas ou procedimentos numéricos simples utilizados para organizar, interpretar, analisar, resumir, descrever os aspectos importantes de um conjunto de fatores ou característica observada na amostra, como também, conhecer a dispersão dos dados (Reis e Reis, 2002; Fisher e Marshall, 2009; Pérez-Vicente e Ruiz, 2009).

Além disso, neste trabalho também foi realizada a análise de correlação entre os indicadores de qualidade (índices de vegetação, biomassa fresca e seca, índice de clorofila, largura do dossel, maturação e produtividade). Essas análises foram utilizadas visando verificar o relacionamento entre as variáveis e a porcentagem de explicação dos índices de vegetação sobre os indicadores, como também se houve diferença entre eles.

Galarça et al. (2010), e Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) colocaram que o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) possui valores que vão de -1 a 1, mostrando

que o valor sugere a força da relação entre as variáveis, de forma que, a correlação perfeita entre duas variáveis é quando os valores estão próximo a 1, correlação perfeita negativa ( $r = -1$ ), de forma que, quando uma variável aumenta a outra diminui, e a positiva ( $r = 1$ ).

Dancey e Reidy (2006) descrevem a classificação para o coeficiente de correlação de Pearson, tal como,  $r = 0,10$  até  $0,30$  (fraco);  $r = 0,40$  até  $0,6$  (moderado);  $r = 0,70$  até  $1$  (forte). De acordo com Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis quando o valor está mais próximo de 1 (independente do sinal), porém menor é a força desta relação quando o valor está mais próximo de zero.

## Resultados

Os maiores valores do coeficiente de correlação para a maioria dos parâmetros avaliados foram aos 45 e 60 DAS devido ao estágio de desenvolvimento R1 e R2 do amendoim, respectivamente (Tabela 1), principalmente aos 45 DAS (estádio R1).

**Tabela 1.** Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) entre as leituras de NDVI, NDRE, IRVI, biomassa fresca e seca, largura do dossel, produtividade, índice de clorofila e maturação aos 30, 45, 60, 75 e 119 dias após a semeadura - DAS ( $n = 63$ ).

IV	Biomassa Fresca (kg ha <sup>-1</sup> )					Biomassa Seca (kg ha <sup>-1</sup> )				
	30	45	60	75	119	30	45	60	75	119
	--- DAS ---					--- DAS ---				
NDVI	0,39**	0,59**	0,27*	0,05 <sup>ns</sup>	-	0,30*	0,45**	0,26*	0,05 <sup>ns</sup>	-
NDRE	0,25*	0,68**	0,40**	-0,15 <sup>ns</sup>	-	0,29*	0,63**	0,38**	-0,06 <sup>ns</sup>	-
IRVI	-0,35**	-0,49**	-0,23 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	-	-0,28*	-0,39**	-0,21 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>	-
	Largura do dossel (cm)					Índice de clorofila (CCI)				
NDVI	-0,08 <sup>ns</sup>	0,47**	0,34**	-0,03 <sup>ns</sup>	-	0,07 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	-
NDRE	0,06 <sup>ns</sup>	0,48**	0,48**	0,15 <sup>ns</sup>	-	0,18 <sup>ns</sup>	0,57**	-0,11 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	-
IRVI	0,11 <sup>ns</sup>	-0,42**	-0,25*	0,03 <sup>ns</sup>	-	-0,06 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	-
	Maturação (%)					Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )				
NDVI	-0,14 <sup>ns</sup>	0,36**	0,18 <sup>ns</sup>	-0,20 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,29*	0,35**	0,07 <sup>ns</sup>	0,35**
NDRE	0,22 <sup>ns</sup>	0,26*	0,19 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,30*	0,26*	0,26*	0,36**	0,26*
IRVI	-0,13 <sup>ns</sup>	-0,37**	-0,14 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	-0,16 <sup>ns</sup>	-0,13 <sup>ns</sup>	-0,26*	-0,29*	-0,04 <sup>ns</sup>	-0,34**

IV: Índice de vegetação; \*\*Significativo a  $p < 0,01$ ; \*Significativo a  $p < 0,05$ ; <sup>ns</sup> Não significativo a  $p > 0,05$ .

De acordo com a classificação de Dancey e Reidy (2006) os maiores valores de correlação foram moderados ( $r = 0,40$  até  $0,6$ ), aos 45 e 60 DAS (estádio R1 e R2) (Tabela 1). Em complemento, na Tabela 2 possui algumas análises estatísticas descritivas. Estas análises por sua vez auxiliam para o melhor entendimento do comportamento dos dados, e ainda, permite o estudo temporal da variabilidade do desenvolvimento do amendoim em relação ao seu estágio fenológico.

**Tabela 2.** Análises estatísticas como coeficiente de variação (CV), desvio padrão e média aritmética simples para NDVI, NDRE, IRVI, largura do dossel, índice de clorofila, biomassa fresca e seca, maturação e produtividade ao longo do tempo, aos 30, 45, 60, 75 e 119 dias após a semeadura - DAS (n=63).

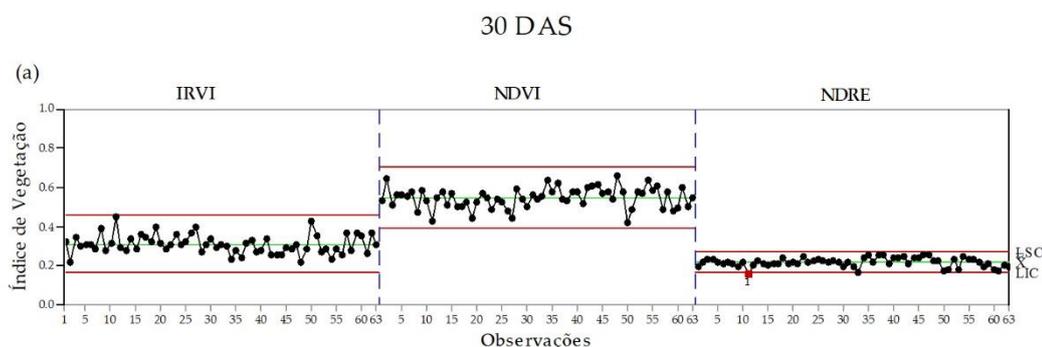
Indicadores de qualidade	30 DAS	45 DAS	60 DAS	75 DAS	119 DAS
	----- Média -----				
NDVI	0,55	0,72	0,88	0,86	0,79
NDRE	0,22	0,28	0,33	0,37	0,31
IRVI	0,31	0,19	0,07	0,08	0,12
Largura do dossel (cm)	20,96	34,12	68,96	84,84	-
Índice de clorofila	29,89	21,52	25,93	34,93	-
Biomassa fresca(kg ha <sup>-1</sup> )	2046,60	6103,00	13896,00	15293,00	-
Biomassa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	672,60	2023,20	5081,00	6718,00	-
Maturação (%)	-	-	-	-	61,41
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	6854,00
	----- Desvio padrão -----				
NDVI	0,05	0,06	0,02	0,08	0,08
NDRE	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04
IRVI	0,05	0,04	0,02	0,07	0,06
Largura do dossel (cm)	3,74	3,77	6,56	4,18	-
Índice de clorofila	4,32	3,77	4,89	3,30	-
Biomassa fresca(kg ha <sup>-1</sup> )	407,80	1334,00	2524,00	2777,00	-
Biomassa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	98,70	406,80	990,00	1371,00	-
Maturação (%)	-	-	-	-	10,09
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	2203,00
	----- CV (%) -----				
NDVI	19,64	7,68	4,19	9,77	10,52
NDRE	10,74	6,59	2,62	2,89	12,61
IRVI	15,70	23,69	26,91	91,84	47,52
Largura do dossel (cm)	17,85	11,05	9,51	4,93	-
Índice de clorofila	14,46	17,56	18,84	9,45	-
Biomassa fresca(kg ha <sup>-1</sup> )	19,92	21,85	18,16	18,16	-
Biomassa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	14,67	20,11	19,50	20,41	-
Maturação (%)	-	-	-	-	16,43
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	32,14

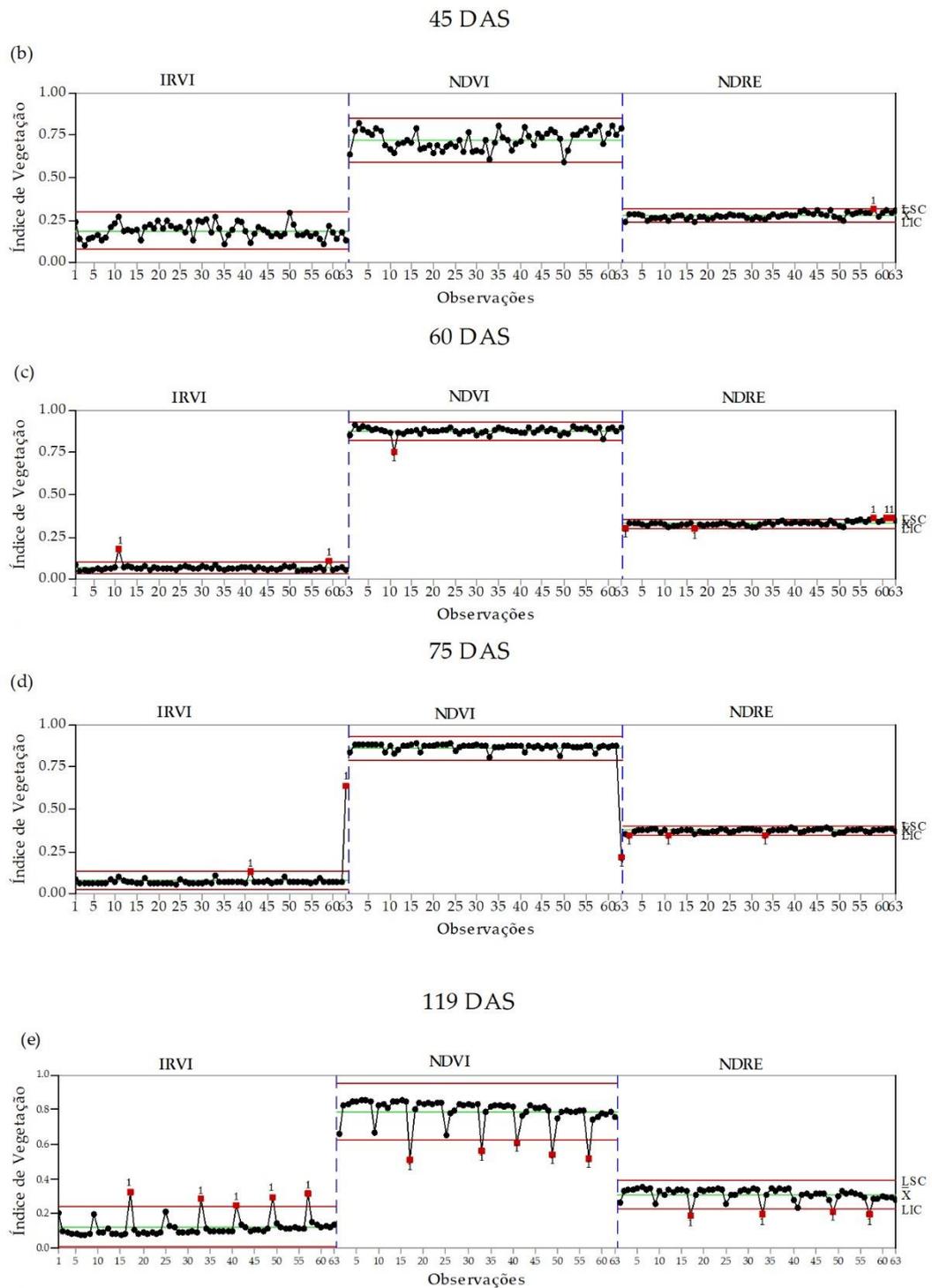
(-) parâmetros que não foram realizados

Aos 45 e 60 DAS obtiveram maiores correlações entre os parâmetros, houve a menor variabilidade dos valores nestes períodos por meio do coeficiente de variação – CV (Tabela 2) e dispersão, e isso pode ser explicado devido ao estágio de desenvolvimento da planta por estarem no reprodutivo R1 e R2, em virtude da planta demandar maior potencial fisiológico e maior translocamento de fluidos e nutrientes em seu interior. Além disso, verifica-se que os menores valores do CV e da dispersão foram para o NDRE, sendo que, quanto menor a variabilidade maior será a qualidade do processo, o que pode ser observado na Figura 7.

Foram observados que em todos os períodos avaliados o índice NDRE apresentou maior qualidade do processo por ter menor variabilidade (Figura 7), que pode ser justificado na Tabela 2 pela análise descritiva, que os valores do coeficiente de variação (CV) variam entre baixos (CV menor ou igual a 10%) e moderados (CV entre 10 e 20%) para o NDRE de acordo com a classificação de Pimentel-Gomes e Garcia (2002).

Houve variabilidade temporal entre os índices devido ao estágio de desenvolvimento do amendoim, as bandas de leituras utilizadas entre os índices, tamanho do dossel da planta, sendo que, nos estádios iniciais a cultura apresentou dossel incompleto tendo influência nas leituras dos sensores a reflectância do solo (Figura 7). Os pontos fora de controle podem ser explicados pelos fatores que influenciam na coleta dos índices de vegetação, tais como, largura do dossel, geometria da folha, estágio de desenvolvimento ou idade da planta, coloração da folha, faixa imageada pelo sensor, dentre outros.





LSC: Limite Superior de Controle. LIC: Limite Inferior de Controle.  $\bar{X}$  : Média

**Figura 7.** Carta de controle de valores individuais para os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) aos 30, 45, 60, 75 e 119 dias após a semeadura - DAS.

## Discussão

A biomassa fresca e seca obtiveram aos 45 DAS (estádio R1) os maiores valores da correlação entre os índices de vegetação quando comparado com os demais parâmetros, principalmente a correlação entre o NDRE e a biomassa (Tabela 1). Corroborando com os resultados obtidos com Amaral et al. (2015b) que verificaram que a biomassa é o parâmetro que mais influência nas leituras dos sensores ópticos ativos.

Quanto a leitura dos índices de vegetação, o NDRE apresentou as maiores correlações em relação aos demais índices para os parâmetros em análise. Amaral et al. (2015a) e Taubinger et al. (2012) verificaram em suas pesquisas na cultura da cana-de-açúcar que o NDRE apresentou menos influência do dossel da planta e que foi mais eficiente para predizer a biomassa do que o NDVI. Shiratsuchi et al. (2010) também verificou que os melhores resultados foram obtidos pelo NDRE do que NDVI para a identificação do nível de nitrogênio no milho.

Esses resultados podem ser explicados devido o NDVI apresentar como limitante a saturação na onda eletromagnético vermelha, em razão da alta absorção dos pigmentos da clorofila, ocasionando a saturação do NDVI nesta banda por causa do dossel da cultura, como também apresentou uma relação não linear entre os parâmetros biofísicos (Baret e Guyot, 1991). Visto que, na maioria dos parâmetros avaliados aos 60 e 75 DAS (estádio R2 e R4, respectivamente), os valores do NDVI foram menores em função da saturação, provavelmente.

O NDVI é a razão entre a região da onda eletromagnética do vermelho e do infravermelho próximo, porém há variações desse índice, com intuito de deixa-lo mais sensível a outros parâmetros, bem como, o teor de clorofila na folha. Esse procedimento é realizado substituindo a banda do vermelho por alguma região do comprimento de onda o “red-edge” (Liu, 2006; Molin et al., 2015).

Quanto a largura do dossel e o índice de clorofila as maiores correlações entre os índices foram aos 45 DAS (estádio R1), principalmente com as leituras do NDRE. Steven et al (1990) explica que o espectro red-edge tem sido uns dos melhores descritores do sensoriamento remoto da concentração de clorofila, pois este comprimento de onda é o ponto máximo de inclinação dos espectros de reflectância

da vegetação. Ainda os mesmos autores citam que isso ocorre entre as bandas 680 a 750 nm, onde a reflectância muda de muito alto no NIR (infravermelho próximo) por causa do crescimento do dossel e da folha, para muito baixo na região de absorção do vermelho pela clorofila. Boochs et al. (1990) e Horler et al. (1983) explicam que o formato e a posição do pico do espectro red-edge são influenciados pelo teor de clorofila, total de biomassa e pelo déficit hídrico no solo.

Kanemasu et al. (1974) relatam que há uma forte correlação entre a quantidade da reflectância do infravermelho próximo/vermelho da cobertura vegetativa e a biomassa ou índice de área foliar (LAI) por unidade de área do solo. Filella e Peñuelas (1994) observaram que no comprimento de onda red-edge obteve a melhor correlação com o teor de clorofila na cultura da pimenta, e ainda viram que neste espectro de onda tem alta sensibilidade com o teor de clorofila.

Li et al. (2017) também verificaram que a posição red-edge é considerado como o comprimento de onda eletromagnética do ponto de inflexão nesta banda (680 a 760 nm) e tem sido muito utilizado para estimar o teor de clorofila na folha.

Taiz e Zeiger (2013) citam que as regiões dos espectros em que a clorofila mais absorve está entre o azul e o vermelho, respectivamente, 430 e 660 nm, respectivamente. Ali et al. (2015), Eitel et al. (2007) e Ehammer et al. (2010) citam o posicionamento de alguns comprimentos de ondas eletromagnéticas, tais como, azul (440 a 510 nm), verde (520 a 590 nm), vermelho (630 a 685 nm), red-edge (690 a 730 nm) e infravermelho próximo – NIR (760 a 850 nm).

Para os parâmetros produtividade e maturação as maiores de correlação foram aos 45 e 60 DAS (estádio R1 e R2, respectivamente). Sendo que, o NDRE aos 60 DAS apresentou maior correlação entre os valores da produtividade. Amaral et al. (2015b) explica que o NDRE tem mostrado resultados mais promissores para predizer a produtividade do que outros índices, tal como, NDVI.

Blackmeret et al. (1996); Jongschaap e Booji (2004); e Tarpley et al. (2000) dizem que o sensoriamento remoto por meio da reflectância do dossel tem potencial para amostragem de uma população de planta do que a planta individual, e pode ser usado de forma rápida para o monitoramento da variabilidade espacial e do crescimento da cultura do trigo em grandes áreas.

Assim, diante a esses resultados o período que é mais viável para o início do monitoramento da produtividade e da maturação seria a partir do 45 DAS (estádio R1) utilizando o NDRE, devido ao potencial fisiológico da planta, pois estava no início da floração, havendo maiores translocações de fluidos e nutrientes do amendoim para a formação das flores. Pois aos 30 DAS (estádio da emergência até o início do florescimento) a maioria dos parâmetros tiveram baixa correlação, principalmente, a largura do dossel, em razão da planta ainda estar pequena e ainda não ter coberto com a vegetação as entrelinhas da cultura, deixando o solo exposto. Isso é explicado por Feng et al. (2016) que dizem que a reflectância espectral do dossel da planta é afetado pelo dossel da cultura, solo, propriedades biofísicas da vegetação, fatores dos quais afetam a precisão das leituras dos índices agronômicos.

As médias observadas entre as leituras dos índices de vegetação, o NDVI foi o que apresentou valores mais altos devido ao problema da saturação com o aumento da biomassa (Tabela 2). Grohs et al. (2009), também observou em seu trabalho que o NDVI aumentou com o acréscimo da biomassa até o valor de saturação, que de acordo com Liu (2006) verificou por meio de imagens orbitais que o valor máximo de saturação do NDVI é 0,84, sendo que, no presente trabalho a média de saturação do NDVI foi 0,89 entre os estádios R2 e R4 (aos 60 e 75 DAS), que pode ser observado na Figura 7 c e d. Moges et al. (2004) e Grohs et al. (2009) observaram o incremento da biomassa a resposta do NDVI teve comportamento padrão, utilizando o sensor GreenSeeker nas culturas de trigo; cevada e trigo, respectivamente.

Analisando separadamente cada índice de vegetação, o NDVI aos 60 e 75 DAS (estádio R2 e R4) apresentou saturação em sua leitura, pois os dados foram os mesmos e demonstram o mesmo comportamento do processo, que pode ser observada na Figura 7c e 6d, isso pode ser explicado por USGS (2015), citou que os valores entre 0,6 a 0,9 demonstram vegetação mais densa, uma vez que o NDVI possui uma escala que varia entre -1 a 1. As cartas de controle foram excelentes ferramentas para o monitoramento temporal do comportamento espectral dos índices, pois por meio desta ferramenta facilitou a visualização no momento em que ocorre a saturação da leitura do NDVI.

Corroborando com os resultados, Zanzarini et al. (2013) observaram que este índice de vegetação tem um fator limitante, em virtude da sua rápida saturação a partir

de determinado estágio de desenvolvimento, devido ao incremento da biomassa, ocorrendo estabilidade na leitura. No entanto, aos 119 DAS que foi realizado um dia anterior ao do arranquio, o NDVI volta a coletar com acurácia os índices, provavelmente, devido à diminuição da biomassa.

Gitelson (2004) e Thenkabail et al. (2000) observaram que o NDVI é facilmente saturado pela densidade do dossel da cultura, ocasionando menor sensibilidade desse índice aos altos índices bioquímicos e fisiológicos da cultura.

Contribuindo com o trabalho, Liu (2006) menciona que índices de vegetação com valores maiores que zero representam a vegetação e os valores próximos a zero correspondem ao solo sem vegetação, de forma que, quanto maior o vigor de desenvolvimento da cultura, maior será o valor do NDVI.

Quanto ao IRVI observou-se (Tabela 1) que os seus valores são inversamente proporcionais ao NDVI. Kapp Júnior et al. (2016) verificaram que a concentração de clorofila no tecido foliar afetada na reflexão do comprimento de onda na faixa do visível, pois quanto menor o nível de clorofila e de aplicação de nitrogênio na cultura, ocorre a redução da absorção da radiação solar na região do visível, havendo diminuição do NDVI e aumento do IRVI.

## **Conclusões**

Aos 45 e 60 DAS (estádio R1 e R2), principalmente aos 45 DAS, foi considerado o tempo ótimo para o monitoramento da variabilidade da cultura do amendoim, pois obteve as melhores correlações entre os indicadores de qualidade avaliados.

Para o monitoramento temporal da cultura por meio das cartas de controle, o NDRE obteve as melhores qualidades de leitura ao longo do processo comparado ao NDVI e IRVI.

## **Referências**

Ag Leader Technology (2011) **Precision Point Blog**. Disponível em: <<http://www.agleader.com/blog/optrx-crop-sensors-a-tech-support-perspective/>>. Acesso em: 13 set. 2017.

Ali M, Montzka C, Stadler A, Menz G, Thonfeld F, Vereecken H (2015) Estimation and Validation of RapidEye-Based Time-Series of Leaf Area Index for Winter Wheat in the Rur Catchment (Germany). **Remote Sensing** 7:2808-2831.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift 22:711-728.

Amaral LR, Molin JP, Portz G, Finazzi FB, Cortinove L (2015a) Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture** 16:15–28.

Amaral LR, Molin JP, Schepers JS (2015b) Algorithm for Variable-Rate Nitrogen Application in Sugarcane Based on Active Crop Canopy Sensor. **Agronomy Journal** 107:1513-1523.

Baret F, Guyot G (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment** 35:161–173.

Blackmer TM, Schepers JS, Varvel GE, Walter-Shea EA (1996) Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal** 88:1–5.

Boochs F, Kupfer G, Dockter K, Kubauch W (1990) Shape of the red edge as vitality indicator for plants. **International Journal of Remote Sensing** 11:1741-1753.

Carneiro FM, Zerbato C, Menezes PC, Girio LAS, Oliveira MF, Furlani CEA (2017) Sensoriamento Terrestre. **Revista Cultivar Máquinas** 15:20-21.

CONAB/INMET (2017a) **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Disponível em:

<[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_02\\_16\\_11\\_51\\_51\\_boletim\\_graos\\_fevereiro\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_02_16_11_51_51_boletim_graos_fevereiro_2017.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2018.

CONAB/INMET (2017b) **Acompanhamento da safra brasileira:** grãos. Disponível em:

<[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_01\\_11\\_11\\_30\\_39\\_boletim\\_graos\\_janeiro\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_11_11_30_39_boletim_graos_janeiro_2017.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2018.

Dancey C, Reidy J (2006) **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows, 3rd ed.**; Artmed: Porto Alegre, 608p.

Eitel JUH, Long DS, Gessler PE, Smith AMS (2007) Using in-situ measurements to evaluate the new Rapideye (TM) satellite series for prediction of wheat nitrogen status. **International Journal of Remote Sensing** 28:4183–4190.

Ehammer A, Fritsch S, Conrad C, Lamers J, Dech S (2010) Statistical derivation of FPAR and LAI for irrigated cotton and rice in arid uzbekistan by combining multi-temporal RapidEye data and ground measurements. In.: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY XII, 782409. **Proceedings...** Toulouse: SPIE Remote Sensing, 7824:10p. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7824/1/Statistical-derivation-of-fPAR-and-LAI-for-irrigated-cotton-and/10.1117/12.864796.full?SSO=1>>. Acesso em: 14 jun. 2018.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 3rd ed. Rev. ampl.; Brasília: EMBRAPA, 353p.

Embratop (2017) Receptor GPS Trimble R6 (L1/L2) Disponível em: <<http://www.embratop.com.br/produto/receptor-gps-trimble-r6-l1-l2/>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

Feng W, Zhanga HY, Zhanga YS, Qi SL, Heng YR, Guo BB, Ma DY, Guo TC (2016) Remote detection of canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat by using water resistance vegetation indices from in-situ hyperspectral data. **Field Crops Research** 198:238–246.

Figueiredo Filho DB, Silva Júnior JÁ (2009) Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje** 18:115-146.

Filella I, Peñuelas J (1994) The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. **International Journal of Remote Sensing** 15: 1459–1470.

Fisher MJ, Marshall AP (2009) Understanding descriptive statistics. **Australian Critical Care** 22:93-97.

Fitzgerald GJ, Rodriguez D, Christensen LK, Belford R, Sadras VO, Clarke TR (2006) Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. **Precision Agriculture** 7:233–248.

Galarça SP, Lima CSM, Silveira G, Rufato AR (2010) Correlação de pearson e análise de trilha identificando variáveis para caracterizar porta-enxerto de *Pyrus communis* L. **Ciência e Agrotecnologia** 34:860-869.

GeoAgri - Tecnologia Agrícola (2012) Greenseeker manual para mapeamento. Disponível em: <<http://www.lojageoagri.com.br/greenseeker-manual-para-mapeamento/>>. Acesso em: 1 out. 2017.

Gitelson AA (2004) Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology** 161:165–173.

Gobbi KF, Garcia R, Garcez Neto AF, Pereira OG, Ventrella MC, Rocha GC (2009) Características morfológicas, estruturais e produtividade do capim-braquiária e do

amendoim forrageiro submetidos ao sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia** 38:1645-1654.

Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N (2009) Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola** 29:101-112.

Grohs DS, Bredemeier C, Poletto N, Mundstock CM (2011) Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. **Pesquisa agropecuária brasileira** 46:446-449.

Grotta DCC, Furlani CEAF, Silva RP, Reis GN, Cortez JW, Alves PJ (2008) Influência da profundidade de semeadura e da compactação do solo sobre a semente na produtividade do amendoim. **Ciência e Agrotecnologia** 32:547-552.

Horler DNH, Dockray M, Barber J (1983) The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing** 4:273-278.

Jongschaap RE, Booij R (2004) Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 5:205–218.

Kanemasu ET, Niblett CL, Manges H, Lenhert D, Newman MA (1974) Wheat: its growth and disease severity as deduced from ERTS-1. **Remote Sensing of the Environment** 3:225-260.

Kapp Junior C, Guimarães AM, Caires EF (2016) Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. **Engenharia Agrícola** 36:886-894.

Li D, Cheng T, Zhou K, Zheng H, Yao X, Tian Y, Zhu Y, Cao W (2017) WREP: A wavelet-based technique for extracting the red edge position from reflectance spectra

for estimating leaf and canopy chlorophyll contents of cereal crops. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 129:103–117.

Liu WTH (2006) **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2nd ed.; UNIDERP: Campo Grande, 908p.

Milan M, Fernandes RAT (2002) Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agricola**, 59(2):261-266.

Minas Verde John Deere (2016) **Trator 7195J John Deere**. Disponível em: <<https://minasverdejohndeere.blogspot.com.br/2016/02/trator-john-deere-7195j.html>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

Minitab 18 (2017) **Suporte ao Minitab 18**: Distribuição normal. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/normal-distribution/>>. Acesso em: 2 out. 2017.

Moges SM, Raun WR, Mullen RW, Freeman KW, Johnson GV, Solie JB (2014) Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition** 27:1.431-1.441.

Molin JP, Amaral LR, Colaço AF (2015) Agricultura de precisão. Oficina de Textos: São Paulo, p.119-153.

Montgomery DC (2009) Introduction to Statistical Quality Control, 6th ed.; Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc., 754p.

Motomiya AVA, Valente IMQ, Molin JP, Motomiya WR, Biscaro GA, Jordan RA (2014) Índice de vegetação no algodoeiro sob diferentes doses de nitrogênio e regulador de crescimento. **Semina: Ciências Agrárias** 35:169-178.

Motomiya AVA, Molin JP, Motomiya WR, Baio FHR (2012) Mapeamento do índice de vegetação da diferença normalizada em lavoura de algodão. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 42:112-118.

Nakagawa J, Rosolem CA (2011) **O amendoim**: Tecnologia de produção. Botucatu: FEPAF, 325p.

Narvaez FY, Reina G, Torres-Torriti M, Kantor G, Cheein FA (2017) A Survey of Ranging and Imaging Techniques for Precision Agriculture Phenotyping. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics** 22:2428-2439.

NTech Industries (2008) **GreenSeeker**: Model 500 Series. Disponível em: <[http://www.ssmgps.com/pdf/DataSheet\\_Model\\_500\\_GS\\_Sensor.pdf](http://www.ssmgps.com/pdf/DataSheet_Model_500_GS_Sensor.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2018.

Pérez-Vicente S, Ruiz ME (2009) Descriptive statistics. **Allergology and Immunopathology** 37:314-320.

Pimentel-Gomes, F. P.; Garcia, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

Santos EP, Silva RP, Bertonha RS, Noronha RHF, Zerbato C (2013) Produtividade e perdas de amendoim em cinco diferentes datas de arranquio. **Revista Ciência Agronômica** 44:695-702.

Savy Filho A, Canecchio Filho V (1796) **Instruções para a cultura do amendoim**. Campinas: Instituto Agrônômico, 23p. (Boletim, 2008).

Sharma R K, Jat ML (2011) Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat. **Agronomy for Sustainable Development** 31:589–603.

Reis EA, Reis IA (2002) **Análise Descritiva de Dados**. Departamento de Estatística, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas: Belo Horizonte, 64 p. Disponível em: <<http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/rte0202.pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2018.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM. **Proceedings...** Washington: NASA, 1:309–330.

Shiratsuchi LS, Ferguson RB, Shanahan JF, Adamchuk VI, Slater GP (2010) Comparison of spectral indices derived from active crop canopy sensors for assessing nitrogen and water status. In: 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. **Proceedings...** Denver: Colorado, USA.

Steven MD, Malthus TJ, Demetriades-Shah TH, Danson FM, Clark JA (1990) High spectral resolution indices for crop stress. In.: Steven MD, Clark JA **Applications of remote sensing in agriculture**. London: Butterworths, p.209-228.

Taiz L, Zeiger E (2013) **Fisiologia Vegetal**. 5th ed. Artmed: Porto Alegre, 918p.

Tarpley L, Reddy KR, Sassenrath-Cole GF (2000) Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science** 40:1814–1819.

Taubinger L, Amaral LR, Molin JP (2012) Vegetation indices from active crop canopy sensor and their potential interference factors on sugarcane. p. 13. In: 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. **Proceedings...** Indianapolis: USA, p.13.

Thenkabail PS, Smith RB, De Pauw, E (2000) Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment** 71:158–182.

Toledo A, Tabile RA, Silva RP, Furlani CEA, Magalhães SC, Costa BO (2008) Caracterização das perdas e distribuição de cobertura vegetal em colheita mecanizada de soja. **Engenharia Agrícola** 28:710-719.

TRIMBLE - Transforming the Way the World Works (2013) **Especificações técnicas**. Disponível em: <<http://www.geodata.eng.br/manuais/gps/trimble/R6.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

TRIMBLE - Transforming the way the world works (2016) Nomad 900 series Handheld Computer. 2016. Disponível em: <<http://www.trimble.com/Mobile-Computing/Nomad-Product-Page.aspx>>. Acesso em: 1 out. 2017.

USGS (2015) **NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology**. United States Geological Survey. Disponível em: <[https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi\\_foundation.php](https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php)>. Acesso em: 20 jan. 2017.

USDA - United States Department of Agriculture (2017) **World Agricultural Production**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

Williams EJ, Drexler JS (1981) A non-destructive method for determining peanut pod maturity. **Peanut Science** 8:134-141.

Zanzarini FV, Pissarra TCT, Brandão FJC, Teixeira DDB (2013) Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 17:608–614.

### **CAPÍTULO 3 – Eficácia de índices de vegetação na detecção da variabilidade da cultura da soja utilizando sensores de dossel<sup>1</sup>**

**Resumo** Técnicas do Sensoriamento Remoto são ferramentas de grande importância em diversas áreas e estão sendo muito utilizadas na agricultura, por permitir obter informações de forma precisa, rápida, em tempo real e de forma não destrutiva. Além disso, estas técnicas permitem o monitoramento das culturas, proporcionando maior conhecimento da variabilidade da lavoura. Assim, objetivou-se comparar o potencial e a performance de três índices de vegetação por meio dos sensores de dossel, monitorando a variabilidade da soja, e ainda verificar o tempo ótimo de leituras dos sensores durante os estádios de desenvolvimento da cultura. O delineamento experimental foi baseado no Controle Estatístico de Qualidade composto por 65 pontos amostrais com GRID 30 x 30 m. Aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS) foi avaliado o comportamento dos parâmetros que foram considerados como indicadores de qualidade, tais como, biomassa fresca e seca, largura do dossel, índice de clorofila, altura de planta, produtividade, e os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) obtidos por meio dos sensores de dossel GreenSeeker e OptRX. O tempo ótimo de leituras dos sensores de dossel, principalmente com o índice NDRE, foram aos 45 e 60 DAS (estádio V5 e V6) devido as melhores correlações entre os indicadores de qualidade, durante os estádios de desenvolvimento da soja. O NDRE apresentou maior qualidade do processo devido a sua menor variabilidade comparado ao NDVI e IRVI.

**Palavras-chave** sensoriamento remoto; sensor óptico ativo; cartas de controle; agricultura de precisão

#### **A comparison of the effectiveness of three vegetation indices in detecting soybean crop variability using canopy sensors**

**Abstract** Remote sensing techniques are tools of great importance in several areas. They are used extensively in agriculture, because the method enables accurate, rapid, real-time, and non-destructive information retrieval. In addition, these techniques enable crop monitoring, therefore providing greater knowledge of crop variability. The objective of this study was to compare the potential and performance of three vegetation indices using canopy sensors in monitoring soybean variability, and to determine the optimal time for taking sensor readings during the crop development stages. The experimental design was based on statistical quality control, and comprised 65 sample points within a 30 × 30 m grid. At 30, 45, 60, 75, and 90 days after sowing (DAS), the behavior of parameters classed as quality indicators, such as fresh and dry biomass, canopy width, chlorophyll index, plant

<sup>1</sup> Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido à revista Precision Agriculture e encontra-se em avaliação.

height, productivity, and three vegetation indices (the normalized distribution [NDVI], normalized difference red-edge [NDRE], and inverse ratio [IRVI] vegetation indices) were measured using GreenSeeker and OptRX canopy sensors. The optimal time for canopy sensor readings, based mainly on NDRE, was at 45 and 60 DAS (V5 and V6 plant development stages), due to the better correlations between quality indicators compared with other stages of soybean development. The lower variability exhibited by NDRE led to its higher process quality when compared with NDVI and IRVI.

**Keywords** remote sensing; active optical sensor; control charts; *Glycine max*; precision agriculture

## Introdução

Devido ao aumento do crescimento populacional nas últimas décadas o conceito de Agricultura de Precisão (AP) se desenvolveu indispensavelmente (Zhang, 2015; United Nations, 2015). Até na década de 1960, o aumento da produção agrícola foi realizado em função da expansão das áreas cultiváveis, porém houve uma diminuição, quando a porcentagem destas áreas atingiu cerca de 9% da área total no mundo (Moldan, 2015).

A Agricultura de Precisão apresenta uma infinidade de benefícios potenciais em rentabilidade, qualidade da cultura, produtividade, desenvolvimento econômico rural, sustentabilidade, proteção ambiental, segurança alimentar, sendo que, a AP possui abordagens modernas e científicas combinadas com as tecnologias de informação para produção agrícola inteligente como também os conhecimentos tradicionais (Shiratschi et al., 2014). De acordo com Molin et al. (2015) a área que tem demonstrado maior potencial para desenvolvimento na área de Agricultura de Precisão é a de sensores, tanto em aplicação quanto em equipamentos.

Shiratschi et al. (2014) relatam que as técnicas do sensoriamento remoto obtêm informações da lavoura de forma rápida, por vezes à distância e não destrutiva, por sua vez têm se tornado muito relevante para a obtenção e tratamentos de dados de campo, sendo que estas técnicas realizam importante papel no campo, como a previsão do tempo, estimativa de produtividade, avaliação da necessidade hídrica das plantas e detecção de doenças e pragas.

O Sensoriamento Remoto é uma importante ferramenta utilizada no monitoramento agrícola, principalmente, por proporcionar a estimativa de safra, determinação da produtividade e de novas áreas agrícolas e o acompanhamento da cultura ao longo do seu ciclo de desenvolvimento (Rudorff, 2010). De acordo com Amaral e Molin (2014), os sensores de dossel são ferramentas úteis para a detecção da variabilidade dentro da lavoura.

Os sensores de dossel surgiram como uma tecnologia para avaliar as características da planta utilizando os princípios da reflectância do dossel e da folha que podem eliminar a tendência inerente às práticas de avaliação. A região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm) é afetada pela estrutura do dossel e pela densidade foliar (Kumar e Silva, 1973), enquanto as clorofilas absorvem mais nos comprimentos de onda na região do vermelho e azul (Lichtenthaler e Buschmann, 2001). Além disso, a região do red-edge (680 a 750 nm) é considerada como o ponto de inflexão entre os comprimentos de ondas do infravermelho próximo e vermelho do espectro, sendo que o red-edge é sensível as alterações do teor de clorofila (Gitelson et al., 1996), que está relacionado com a produtividade primária bruta das plantas terrestres (Gitelson et al., 2006).

Os índices de vegetação são fórmulas matemáticas baseadas em diversas combinações de valores de bandas específicas do espectro eletromagnético. O conhecimento sobre o comportamento espectral da vegetação é fundamental para a interpretação dos resultados. Os métodos de avaliação das características do dossel utilizado os índices de vegetação estão ganhando mais relevância, pois todo processo é efetuado de forma não-destrutiva (Richards, 1993). Por isso, é possível realizar várias análises em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura (Jones e Vaughan, 2010).

A resposta espectral das culturas agrícolas é influenciada pelas características físicas do dossel, e uma série de fatores bioquímicos do vegetal, do qual, estes fatores estão condicionados aos parâmetros agrônômicos, arquitetura do dossel, condições atmosféricas, química foliar e pelos pigmentos presentes nas folhas, como carotenos, antocianinas, clorofila a e b, e xantofila (Abdel-Rahman et al., 2008), que influenciam nos processos fisiológicos relacionados ao desenvolvimento da planta ou na absorção da radiação eletromagnética (Martins e Galo, 2015).

Uma ampla gama de sensores terrestres, funcionam de forma ativa ou passiva, estão sendo utilizados para a produção de índices de vegetação, para o monitoramento das propriedades biofísicas e atividades fotossintéticas (Thenkabail et al., 2000; Hansen et al., 2003).

A reflectância do dossel tem sido utilizada em culturas agrícolas, tais como, o trigo e milho, para avaliar o estado da planta e auxiliar nas práticas de manejo durante o desenvolvimento da cultura, porém há poucas pesquisas voltadas para o uso da reflectância do dossel na pesquisa e produção da soja (Miller et al., 2018).

Diante ao exposto, objetivou-se comparar o potencial e a performance de três índices de vegetação por meio dos sensores de dossel, monitorando a variabilidade da soja, para os parâmetros biomassa fresca e seca, altura

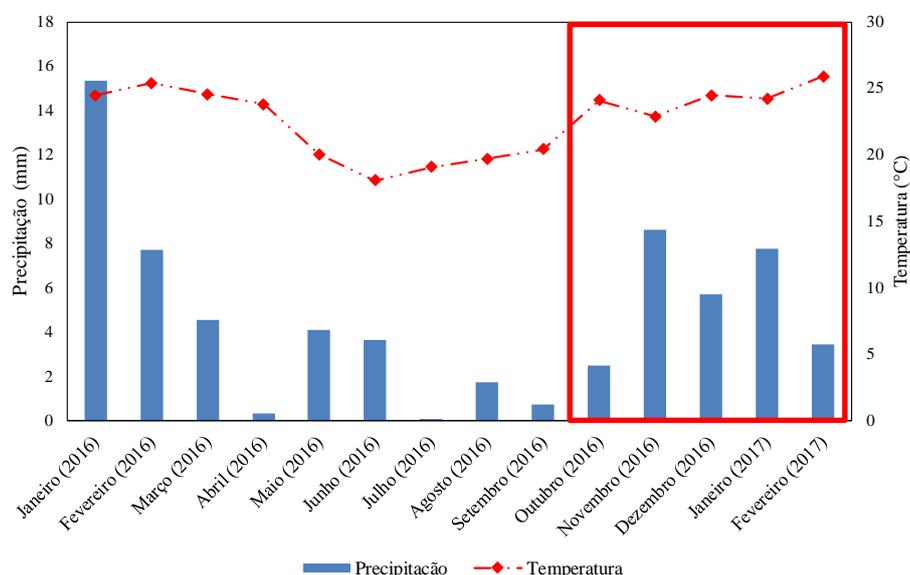
de plantas, índice de clorofila, produtividade, e ainda verificar o tempo ótimo de leituras dos sensores durante os estádios de desenvolvimento da cultura.

## Material e Métodos

### Descrição da área experimental

O estudo da variabilidade espacial e temporal dos índices de vegetação na cultura da soja, foi realizado na safra de 2016/17 em área agrícola do município de Jaboticabal localizada próximo às coordenadas 21°15'19.6''S e 48°15'38.5''W, estado São Paulo, Brasil.

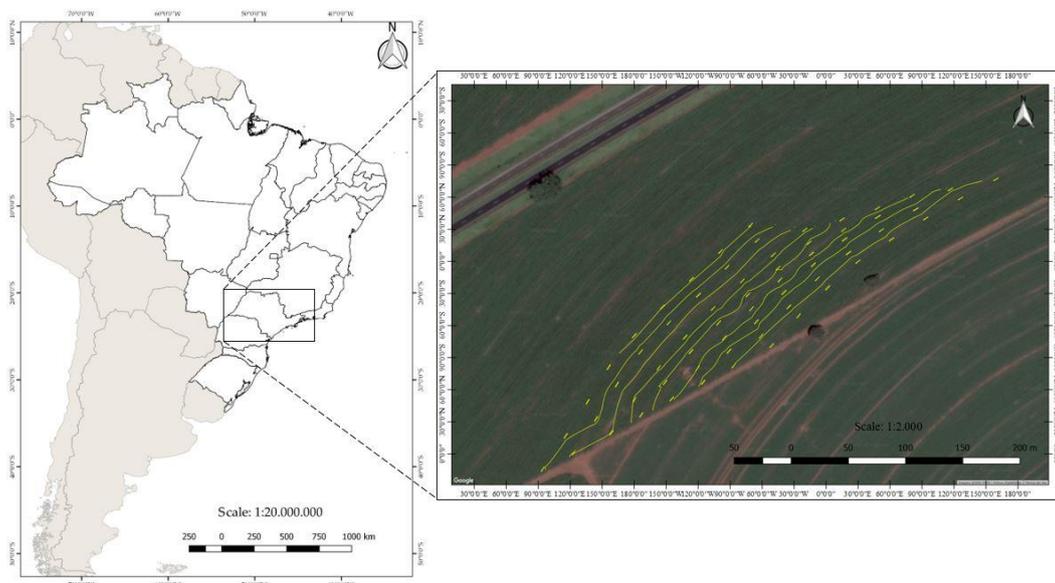
O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho de acordo com Embrapa (2013). Quanto ao clima desta região é Aw, isto é, tropical com inverno seco, de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013), com temperatura média de 22,2°C. O período de chuva, normalmente, ocorre entre os meses de outubro a março, com pluviosidade média anual de 1424 mm (Silva, 2013). Os dados pluviométricos da área experimental são apresentados na Figura 1, em que o período de condução do experimento foi realizado de outubro de 2016 a fevereiro de 2017.



**Fig. 1** Dados pluviométricos foram obtidos pela média mensal da temperatura e precipitação, área em destaque foi o período das avaliações do experimento, de outubro de 2016 a fevereiro de 2017, de Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil. Fonte: Estação meteorológica da marca DAVIS do Laboratório de Instrumentação, Automação e Processamento do Departamento de Engenharia Rural, Unesp/Fcav, Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil.

### Delineamento experimental

O delineamento experimental foi baseado no Controle Estatístico de Qualidade – CEQ (Montgomery, 2009), composto por 65 pontos amostrais com “grid” 30 x 30 m. A localização da área experimental pode ser observada na Figura 2.



**Fig. 2** Localização da área experimental localizada no município de Jaboticabal, estado São Paulo, Brasil.

Aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS) foi avaliado o comportamento dos parâmetros que foram considerados como indicadores de qualidade por meio do monitoramento das características biofísicas da soja, tais como, biomassa fresca e seca, largura do dossel, índice de clorofila, altura de planta, produtividade. Apenas para o parâmetro produtividade as avaliações foram feitas no final do ciclo aos 90 DAS (estádio R6). Os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) foram coletados por meio dos sensores de dossel para correlacionar com as características biofísicas da soja como também comparar entre os índices as melhores leituras durante os estádios de desenvolvimento da soja.

Cada ponto amostral ou parcela foi constituído por duas linhas com 5 metros de comprimento com 0,45 m de espaçamento entre as linhas, perfazendo 4,5 m<sup>2</sup> de área útil por ponto. Todas as avaliações foram realizadas em todos os pontos monitorando a variabilidade espaço-temporal da cultura da soja.

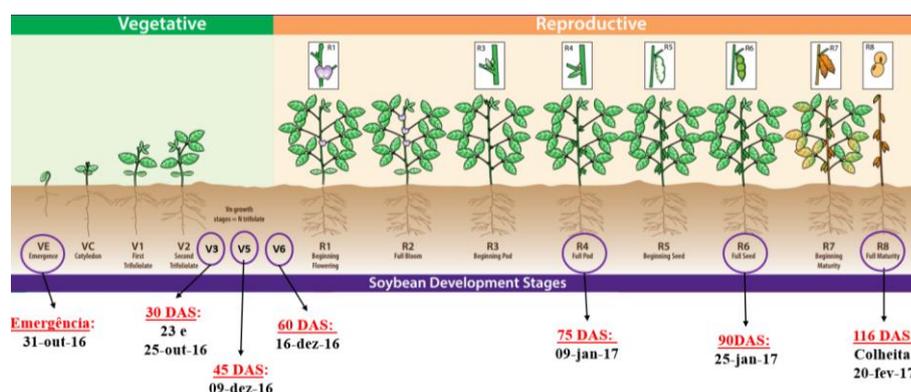
Os 65 pontos amostrais foram georreferenciados com o receptor GNSS Trimble R6, com sistema GNSS, antena de alta precisão, receptor GPS integrado, recebendo sinal de posicionamento RTK - Real Time Kinematic e antena de alta precisão (Trimble, 2013; Embratop, 2017).

## Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a semeadura foram a semeadora da marca Marchesan, modelo COP SUPREMA, que foi acoplada ao trator da Massey Ferguson, modelo MF 7180. O espaçamento entre linhas foi 0,45 m com densidade de semeadura 24 sementes m<sup>-1</sup> da cultivar TMG 7060 IPRO. Quanto à adubação foi realizada na semeadura com 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 04-20-20. No dia da semeadura foi verificado, na camada de 0-20 cm, umidade do solo em torno de 15,38%.

## Sensores ativos de dossel

Na Figura 3, observam-se os períodos avaliados do experimento em relação aos estádios de crescimentos da cultura da soja. As leituras dos índices de vegetação foram realizadas sobre o dossel da planta com os sensores de acordo com Grohs et al. (2011).



**Fig. 3** Estádio de desenvolvimento da cultura da soja com as datas de avaliações. Fontes: Ciampitti, I.; Shoup, D.; Duncan, S. (2017), K-State Research and Extension, adaptado de Carneiro, F.M. (2018).

O GreenSeeker é um sensor da Trimble, modelo 500, que emite radiação em dois comprimentos de onda, na região do infravermelho próximo – NIR (770 nm) e no vermelho (660 nm), com largura de banda cerca de 25 nm (Povh et al., 2008; Amaral et al., 2015). O sensor por sua vez capta a luz refletida pela planta e calcula o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (Motomiya et al., 2014). O outro índice obtido juntamente com o NDVI foi o Inverse Ratio Vegetation Index –IRVI, que também foi utilizado por Kapp Júnior et al. (2016), avaliando a eficiência dos sensores de dossel.

Neste trabalho, as leituras do sensor foram mantidas na altura de trabalho entre 0,6 e 0,7 m, pois de acordo com o fabricante (Trimble) a altura de trabalho recomendada para este sensor, deve estar entre 0,6 a 1,2 m de distância em relação ao alvo (planta).

O OptRX é um sensor ativo de dossel da Ag Leader, modelo ACS430. Por meio desse sensor é possível obter dois índices de vegetação o NDRE e NDVI. Porém, neste trabalho utilizou-se o NDRE, pois o NDVI foi coletado com o GreenSeeker. A altura de leitura foi mantida a mesma e posicionada acima da copa entre 0,60 a 0,70 m, com faixa de leitura de 60% da altura de leitura.

A empresa Ag Leader Technology (2011) explica que este sensor emite uma luz própria, que mede a reflectância de algumas ondas eletromagnéticas específicas, e esta luz medida indica o teor de clorofila e a biomassa, permitindo ao sensor obter o índice de vegetação.

Para a utilização do OptRX, o Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) confeccionou um suporte para o transporte deste sensor (Figura 4), para os experimentos realizados a campo, permitindo o monitoramento dos estádios de crescimento da cultura. Este suporte foi baseado no modelo desenvolvido pela Professora Doutora Brenda V. Ortiz, da Universidade de Auburn (Alabama, EUA). Foi utilizada uma bicicleta como suporte, possibilitando o transporte dos sensores GreenSeeker e CropCircle para as suas pesquisas realizadas a campo (Carneiro et al., 2017).



**Fig. 4** Suporte confeccionado pelo LAMMA, para transportar o sensor OptRx, para a coleta dos dados a campo.

### **Índices de vegetação**

Os índices de vegetação avaliados neste trabalho foram o NDVI e IRVI, obtidos pelo GreenSeeker, e o NDRE, obtido pelo OptRX. Na Tabela 1 observa-se o cálculo para cada índice.

**Tabela 1** Índices de vegetação.

Índice de vegetação	Cálculo do índice	Fonte
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{F_{\text{NIR}} - F_{\text{Red}}}{F_{\text{NIR}} + F_{\text{Red}}}$	Rouse et al. (1973)
NDRE	$\text{NDRE} = \frac{\text{NIR} - \text{RE}}{\text{NIR} + \text{RE}}$	Buschmann and Nagel (1993)
IRVI	$\text{IRVI} = \frac{R_{650}}{R_{770}}$	Kapp Júnior et al. (2016)

*NDVI* Normalized Differential Vegetation Index, *NIR* frações de emissão no infravermelho próximo, *Red* frações de emissão do vermelho, *NDRE* Normalized Difference Red Edge, *RE* índices da taxa red-edge, *IRVI* Inverse Ratio Vegetation Index. *NIR* 774 nm, *Red* 656 nm, *RE* 720 nm

O índice NDVI foi calculado pelas bandas do vermelho (660 nm) e infravermelho (770 nm) (Povh et al., 2008). O IRVI foi calculado pelas bandas na região de 650 e 770 nm (Kapp Júnior et al., 2016). O NDRE foi resultante das bandas 790 e 720 nm (Fitzgerald et al., 2006).

### Indicadores de qualidade

Os parâmetros avaliados:

- Altura de planta e largura do dossel - utilizou-se uma trena graduada em cm, a largura do dossel mediu-se de uma extremidade a outra da planta e a altura de plantas foi medida em relação ao nível do solo até o ponto mais alto da planta.
- Biomassa fresca (“*in natura*”) e seca - utilizou-se uma armação com área de 0,5 m<sup>2</sup> (0,5 x 0,5 m). Onde cortou-se a planta rente ao solo com auxílio de uma faca (as raízes não foram consideradas). As plantas coletadas foram colocadas em sacos de papel e suas massas foram aferidas, obtendo a massa fresca, depois foram colocadas em uma estufa com circulação na temperatura de 65°C por 72 h (Gobbi et al., 2009; Grohs et al., 2009), posteriormente, suas massas foram aferidas, obtendo a massa seca. As amostras foram pesadas em balança semi-analítica;
- O índice de clorofila foi obtido pelo clorofilômetro - da Marcone, modelo CCM-200 plus; com precisão de ± 1 unidade CCI (Índice de Conteúdo de Clorofila). As leituras foram realizadas em 3 folhas por ponto as coletando aleatoriamente. Em cada folha fez-se 3 leituras, visando a maior precisão dos dados.

- Produtividade de grãos - utilizando uma armação com área de 0,5 m<sup>2</sup>, sendo que, as plantas foram cortadas rente ao solo e levadas para serem trilhadas em uma colhedora de parcelas combinadas da marca Wintersteiger Seedmech, modelo Nursey Mster Elite, onde obteve-se grãos limpos. Posteriormente, os grãos foram pesados e os dados foram transformados em kg ha<sup>-1</sup> (Bertolin et al., 2010).

### **Análises estatísticas**

Neste trabalho utilizou-se controle estatístico de qualidade por meio das cartas de controle, análise descritiva, e de correlação por meio do coeficiente de correlação de Pearson.

Por meio do Controle Estatístico de Qualidade analisou-se os indicadores de qualidade, utilizando as cartas de controle de valores individuais, uma das ferramentas muito utilizada do Controle Estatístico de Processo (CEP), e que pode ser observado em diversos trabalhos, entre eles do Chioderoli et al. (2012), Zerbato et al. (2013), Voltarelli et al. (2015) entre outros, por possibilitar o monitorando do comportamento dos dados ao longo do tempo.

As cartas de controles de valores individuais são formadas pelos limites de controle superior (LSC) e inferior (LIC), e pela média aritmética. Estes limites são obtidos pela média e desvio-padrão dos valores analisados por parâmetro, sendo LIC = média - 3 vezes o desvio padrão e LSC = média + 3 vezes o desvio padrão (Toledo et al., 2008). Em uma distribuição normal 99,7% das observações estão dentro de + ou - 3 desvios padrão da média (Minitab, 2017).

As análises descritivas são procedimentos numéricos simples utilizados para resumir, analisar, organizar, descrever os aspectos importantes de um conjunto de característica observada na amostra (Reis e Reis, 2002; Fisher e Marshall, 2009; Pérez-Vicente e Ruiz, 2009).

A análise de correlação foi realizada para verificar o comportamento entre os indicadores de qualidade (índices de vegetação, biomassa fresca e seca, índice de clorofila, largura do dossel, altura de plantas e produtividade). Este coeficiente é uma análise estatística usada para medir a intensidade, força ou o grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias (Stevenson, 2001; Bunchaft & Kellner, 2002; Barbetta et al., 2004; Kazmier, 2007; Ferreira, 2009).

Galarça et al. (2010) e Figueiredo Filho (2009) mencionam que o coeficiente de correlação de Pearson (r) possui valores que variam de -1 a 1. O sinal do coeficiente mostra a intensidade e o sentido da correlação, podem

encontrar correlação linear com ausência de relação linear ( $r = 0$ ), positiva perfeita ( $r = 1$ ) ou negativa positiva ( $r = -1$ ) (Cruz & Regazzi, 1997; Cruz & Carneiro, 2003; Hair et al., 2005).

## Resultados e Discussão

As análises de correlação do coeficiente de Pearson (Tabela 2) aos 45 e 60 DAS (estádio V5 e V6) apresentaram as melhores correlações devido o maior potencial de desenvolvimento fisiológico da cultura, por isso os índices tiveram melhores correlações com os componentess agrônômicos (biomassa fresca e seca, largura do dossel, índice de clorofila, altura de plantas e produtividade).

**Tabela 2** Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) entre as leituras de NDVI, NDRE, IRVI, biomassa fresca e seca, largura do dossel, produtividade, índice de clorofila e maturação aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura - DAS ( $n = 65$ ).

	Biomassa Fresca ( $\text{kg ha}^{-1}$ )					Biomassa Seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				
	----- DAS -----									
IV	30	45	60	75	90	30	45	60	75	90
NDVI	-0,01 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>**</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>**</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>
NDRE	0,15 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>**</sup>	0,40 <sup>**</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	-0,09 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	0,34 <sup>**</sup>	0,35 <sup>**</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	-0,17 <sup>ns</sup>
IRVI	0,02 <sup>ns</sup>	-0,17 <sup>ns</sup>	-0,38 <sup>**</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,20 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,33 <sup>**</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>
	Largura do dossel (m)					Índice de clorofila (CCI)				
NDVI	-0,03 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>**</sup>	-0,17 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>**</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>*</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>**</sup>
NDRE	0,11 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>**</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,41 <sup>**</sup>	0,27 <sup>*</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,40 <sup>**</sup>
IRVI	0,05 <sup>ns</sup>	-0,17 <sup>ns</sup>	-0,38 <sup>**</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	-0,53 <sup>**</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	-0,28 <sup>*</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	-0,52 <sup>**</sup>
	Altura de plantas (m)					Produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				
NDVI	0,04 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>**</sup>	0,49 <sup>**</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>**</sup>	-0,00 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>
NDRE	0,26 <sup>*</sup>	0,32 <sup>**</sup>	0,69 <sup>**</sup>	0,40 <sup>**</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>
IRVI	-0,05 <sup>ns</sup>	-0,43 <sup>**</sup>	-0,47 <sup>**</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>	-0,50 <sup>**</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>

IV: Índice de vegetação; \*\*Significativo a  $p < 0,01$ ; \*Significativo a  $p < 0,05$ ; <sup>ns</sup> Não significativo a  $p > 0,05$ .

Corroborando com este resultado, Amaral e Molin (2014) concluíram que os resultados mais satisfatórios pelo sensor de dossel podem ser adquiridos e mensurados quando se têm o acúmulo de biomassa suficiente, pois, normalmente, quando ocorre avaliação no final do desenvolvimento da cultura os sensores têm menor sensibilidade aos resultados devido ao acúmulo excessivo de biomassa. Isso também pode ser observado no presente trabalho aos 75 e 90 DAS (estádio R4 e R6).

Os valores mais baixos observados ao 30 DAS (estádio V3) podem ser explicados devido a influência do solo e a menor largura do dossel da planta. Moreira (2011) explica que quando a cultura está no início do desenvolvimento vegetativo o dossel é considerado incompleto por ter baixa porcentagem de cobertura vegetal do

solo, sendo que, da energia refletida, parte é proveniente do solo e a outra da planta. Por isso, neste trabalho obteve-se baixos valores de correlação por causa da influência do solo nas leituras dos sensores.

Os parâmetros que tiveram melhores correlação foram biomassa fresca e seca, largura do dossel, índice de clorofila e altura de plantas, principalmente para o índice NDRE (Tabela 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Portz et al. (2012), no qual utilizaram sensor de dossel nos comprimentos de onda da região do red-edge e do NIR e detectou boa performance do sensor para a predição de absorção de nitrogênio e biomassa. Amaral e Molin (2014) observaram que a quantidade de biomassa de cana-de-açúcar influenciou mais a leitura do sensor do que os pigmentos da folha.

Os sensores de dossel são eficiente ferramenta para predizer a produtividade (Raun et al., 2001; Teal et al., 2006; Lofton et al., 2012). Porém no presente trabalho os valores de correlação para a produtividade foram baixos, isso pode ser explicado por Raun et al. (2005), Kitchen et al. (2010), e Amaral e Molin (2014) que relataram a dificuldade de se obter boa relação entre a produtividade e os sensores de dossel devido aos vários fatores que não são controláveis e podem afetar a produtividade entre o tempo que as leituras são mensuradas e tempo de colheita, tais como, ataque de pragas, estresse climático e manejo de culturas.

O NDRE apresentou os melhores valores de correlações do que o NDVI e IRVI. Cao et al. (2015); Cao et al. (2016) e Amaral et al. (2015) observaram que os índices de vegetação com comprimentos de onda na região do red-edge conseguiram superar o problema da saturação do NDVI. Taskos et al. (2015) ao compararem os índices NDRE com o NDVI, o NDRE por apresentar banda red-edge, apresentou maior resistência ao problema da saturação do que o NDVI.

Ma et al. (2001) verificaram que as condições de crescimento podem afetar a associação do NDVI com a produtividade da soja, tais como, condições ótimas podem resultar em melhores germinações e rápida cobertura do solo para a captura da radiação solar, no entanto clima seco e frio antes do plantio pode atrasar a emergência e ocasionar diminuição da produtividade.

Normalmente, a maioria dos solos cobertos com plantas apresentam um pico de absorção no comprimento de onda da região do vermelho, logo quando isso ocorre o NDVI torna-se insensível para a detecção da alteração da biomassa e ainda pode refletir na produtividade (Povh et al. 2008). Li et al. (2010a) e Cao et al. (2015), avaliando o desempenho dos sensores de dossel para a cultura do trigo, observaram que o NDVI apresenta problema com saturação devido a quantidade de biomassa.

O efeito da saturação está relacionado com o efeito de normalização incorporado para o cálculo do índice de vegetação e ao tipo de banda escolhida (Van Niel e McVicar, 2004; Gnyp et al., 2014). Os problemas de saturação podem ser diminuídos utilizando comprimentos de onda com penetração similar no dossel da planta (Van Niel and McVicar, 2004) ou taxa de índices de vegetação (Gnyp et al., 2014).

O IRVI tem sido utilizado para a predição da biomassa em áreas com alta intensidade vegetativa, e este índice é menos suscetível a saturação (Hatfield e Prueger, 2010; Li et al., 2010b; Bolfe et al., 2012).

O NDVI é usado para estimar a produtividade da cultura com a utilização da região do NIR para a análise da composição da biomassa, e por meio deste índice foram criados métodos para a obtenção de dados por meio da reflectância que é muito utilizado, nos últimos anos, na área agrícola, porém a banda red-edge pode proporcionar melhor ajuste de um modelo para prever a produtividade da soja (Mourtzinis et al., 2014).

Estudos recentes mostram a superioridade de modelos que utilizam o NDRE, que apresentam aumento de 28% no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do que quando comparado aos modelos que usam como comprimento de onda na região do vermelho (Eitel et al., 2010).

A banda red-edge penetra profundamente no dossel da planta e possui sensibilidade com a clorofila do dossel da vegetação na biomassa mais alta do dossel, superando a saturação inerente ao NDVI, sendo que este índice de vegetação é o mais utilizado (Li et al., 2014). Eitel et al. (2010) observaram quando é utilizado a região do red-edge ocorre aumento da habilidade para estimar as variações do teor de clorofila ( $r^2 > 0.73$ ) do que quando não se usa o red-edge ( $r^2 = 0.57$ ).

Além disso, foi observado que o NDVI e IRVI são inversamente proporcionais, isto é, quando um aumenta o outro tende a diminuir (Tabela 1), e isso pode ser explicado por Kapp Júnior et al. (2016) que a concentração de clorofila no tecido foliar influencia na reflexão do comprimento de onda na região do visível, sendo que, quanto menor a aplicação de nitrogênio para a planta, menor será o nível de clorofila como também reduz a absorção da radiação solar na faixa do visível, ocasionando aumento do IRVI e diminuição do NDVI. Motomiya et al. (2009), também relatam que menor quantidade de entrada de nitrogênio causa diminuição da taxa de expansão da folha, da clorofila e reduz o desenvolvimento da cultura.

Portanto, o tempo ótimo de leituras dos sensores de dossel, principalmente com o índice NDRE, foram aos 45 e 60 DAS (estádio V5 e V6) devido as melhores correlações entre os indicadores de qualidade (índices de vegetação vs. biomassa fresca e seca, largura de dossel, índice de clorofila, produtividade e maturação), durante os estádios de desenvolvimento da soja (Tabela 2).

As análises descritivas foram realizadas para verificar a variabilidade espaço-temporal das variáveis. Na Tabela 3 foi observado a dispersão dos valores que variaram muito ao longo do tempo devido a capacidade de as folhas realizarem fotossíntese, em que, há um aumento desde a emergência da plântula até a sua maturidade fisiológica, sendo que, a taxa fotossintética diminui bastante até a completa maturação da planta (Moreira, 2011). O mesmo autor relata que a fotossíntese está relacionada com a quantidade de radiação absorvida na região do visível, nas bandas do vermelho e do azul, sendo que, folha em senescência reflete mais a região do visível do que a folha jovem.

**Tabela 3** Análises estatísticas como coeficiente de variação (CV), desvio padrão e média aritmética simples para NDVI, NDRE, IRVI, largura do dossel, índice de clorofila, biomassa fresca e seca, maturação e produtividade ao longo do tempo, aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura - DAS (n=63).

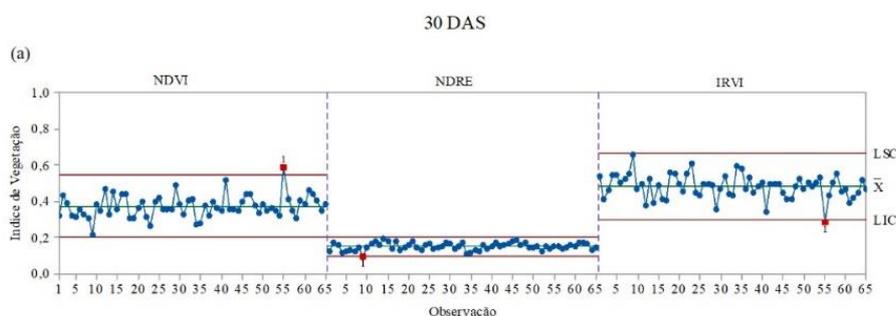
Indicadores de qualidade	30 DAS	45 DAS	60 DAS	75 DAS	90 DAS
	----- CV (%) -----				
NDVI	16,85	12,87	10,37	4,65	3,40
NDRE	13,78	11,92	9,16	5,92	6,22
IRVI	13,68	33,44	43,51	27,21	27,49
Largura do dossel (m)	24,69	9,65	8,39	6,73	9,10
Índice de clorofila	16,96	12,50	21,11	11,19	10,20
Biomassa fresca (kg ha <sup>-1</sup> )	34,75	31,48	26,45	25,10	24,55
Biomassa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	33,96	31,73	30,15	29,10	25,30
Altura de plantas (m)	10,60	9,03	9,25	8,23	6,99
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	24,48
	----- Desvio padrão -----				
NDVI	0,06	0,09	0,08	0,04	0,03
NDRE	0,02	0,03	0,2	0,02	0,02
IRVI	0,07	0,07	0,06	0,02	0,02
Largura do dossel (m)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
Índice de clorofila	2,63	2,74	5,10	4,53	4,24
Biomassa fresca (kg ha <sup>-1</sup> )	413,9	1360	1879	6476	8149
Biomassa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	73,27	254,8	422,5	1739	2384
Altura de plantas (m)	0,02	0,03	0,04	0,07	0,06
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	1302
	----- Média -----				
NDVI	0,37	0,66	0,76	0,86	0,88
NDRE	0,15	0,21	0,26	0,36	0,34
IRVI	0,48	0,21	0,15	0,08	0,07
Largura do dossel (m)	0,16	0,38	0,47	0,58	0,58
Índice de clorofila	15,49	21,90	24,14	40,50	41,52
Biomassa fresca (kg ha <sup>-1</sup> )	1191,2	4322	7107	25798	33193
Biomassa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	215,72	803,1	1401,0	5975	9422
Altura de plantas (m)	0,16	0,33	0,47	0,83	0,87
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	5320

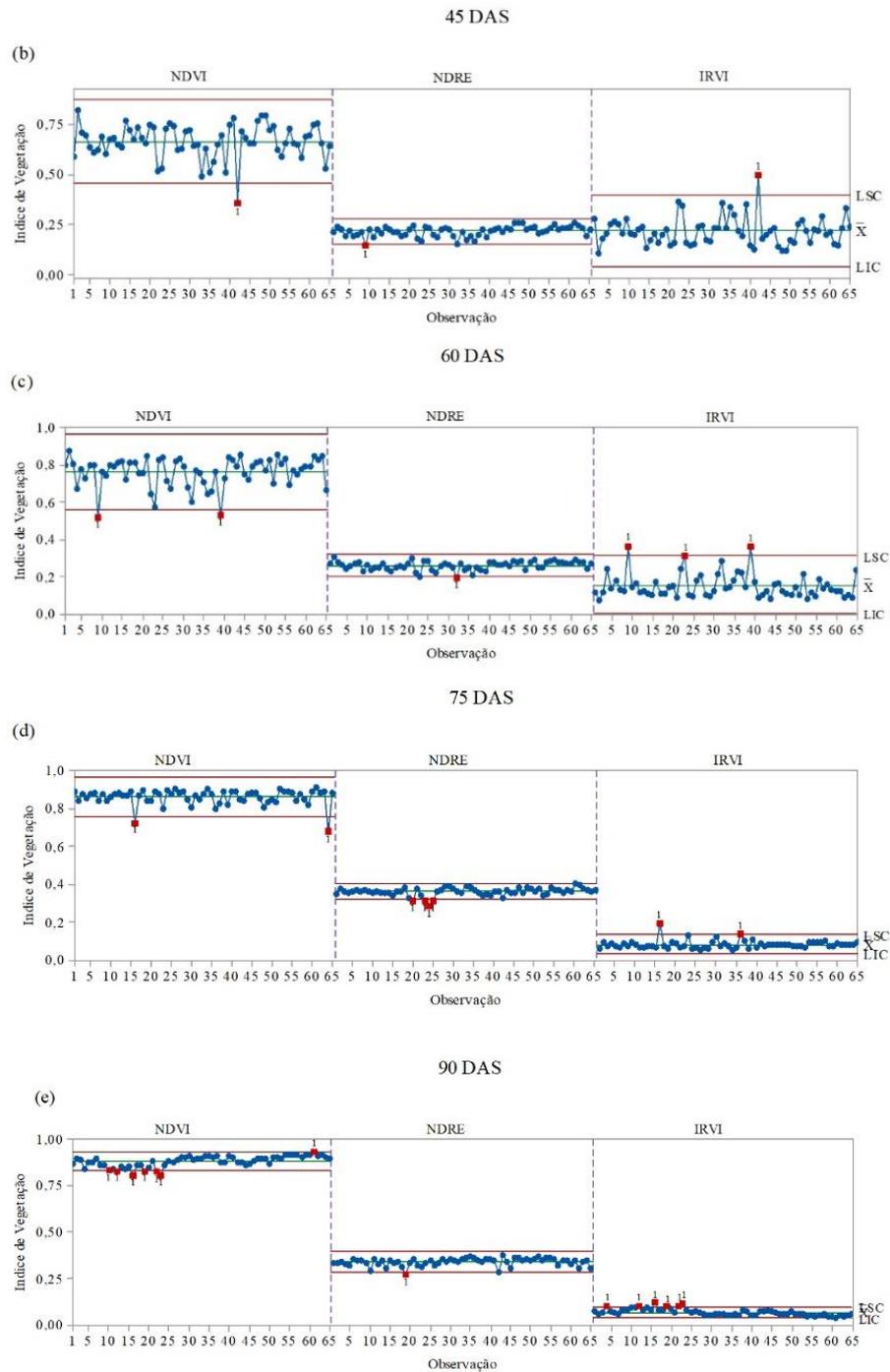
Em complemento, à medida que o dossel se desenvolve a planta absorve mais na região do vermelho devido ao aumento da fotossíntese, porém a radiação refletida também aumenta na região do infravermelho próximo (Jensen, 2011). A energia proveniente deste infravermelho não é aproveitada pela fotossíntese, no entanto é usada pela cultura para a vibração molecular ou aquecimento (Moreira, 2011). No presente trabalho, pode-se observar esse comportamento da energia provenientes da banda do visível e do infravermelho vermelho próximo, pois para o cálculo dos três índices foi utilizado estas bandas (Tabela 1).

O comportamento espectral da vegetação pode ser influenciado pelo tipo de substrato e pela arquitetura do dossel (Novo, 2008). Esse efeito foi observado por Luiz et al. (2001) para o espectro da cultura da soja, no qual, o comportamento espectral desta cultura foi afetado pela reflectância do solo, pois a mesma não atingiu o completo recobrimento do solo, ocasionando redução da reflectância. Por isso, aos 30 DAS, nos estádios iniciais, os valores do coeficiente de variação e dispersão (Tabela 3) foram maiores comparado aos demais períodos, em virtude da influência do solo e a largura do dossel da planta.

Em função da influência do tipo da arquitetura do dossel sobre o comportamento espectral, tem visto aumento considerável na quantidade de estudos sobre o impacto das variáveis do dossel, da geometria de aquisição dos dados, altura e forma do dossel, práticas agrícolas e das espécies sobre o comportamento espectral da vegetação (Kimes, 1983; Guyot, 1984; Valeriano, 1992; Gleriani, 1994; Ferri, 2002; Galvão et al., 2004 a 2005, 2006).

Por meio das cartas de controle (Figura 5), e em complemento as análises descritivas, foi possível realizar o monitoramento da variabilidade espaço temporal dos índices (NDVI, IRVI e NDRE) como também a performance destes índices por meio dos sensores de dossel. O NDRE apresentou maior qualidade do processo devido a sua menor variabilidade comparado ao NDVI e IRVI, isso também pode ser observado na Tabela 3, os menores valores dos coeficientes de variação e dispersão.





LSC: Limite Superior de Controle, LIC: Limite Inferior de Controle,  $\bar{X}$  : Média, DAS dias após a semeadura, NDVI normalized difference vegetation index, NDRE normalized difference red-edge index, IRVI inverse ratio vegetation index

**Fig. 5** Carta de controle de valores individuais para os índices de vegetação (NDVI, NDRE e IRVI) aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura - DAS.

Miller et al. (2018) avaliaram vários estádios de desenvolvimento da cultura da soja no período de 2015 e 2016, utilizando sensor de dossel, no qual o índice utilizado foi o NDRE para verificar a sua utilidade para esta

cultura, ao invés do NDVI, pois este apresenta limitações. Os autores constataram que o NDRE pode ser usado em condições com maior biomassa do dossel vegetativo e o sensor ativo de dossel consegue superar as limitações encontradas pelos sensores passivos, tais como, tempo de leitura dos sensores e presenças de nuvens. Isto também foi observado nas cartas de controle em que o NDRE apresentou maior resistência de suas leituras a saturação do que o NDVI. Além disso, as cartas de controle demonstraram ótima ferramenta, por permitir visualizar o período em que ocorre a saturação do NDVI.

Aos 75 e 90 DAS (estádio R4 e R6), nas Figuras 5d e 5e, o NDVI demonstrou problema de saturação, interferindo na precisão das leituras, devido ao incremento da biomassa. Cao et al. (2015) e Cao et al. (2016) citam que um desafio para a utilização do sensor GreenSeeker é que o NDVI em condições de alta e média biomassa apresenta problema com a saturação, por isso não é considerado adequado em áreas com alta produtividade.

O problema com a saturação do NDVI também foi observado por Mutanga et al. (2004), no qual, observaram que os índices de vegetação calculados utilizando as bandas do infravermelho próximo e do vermelho, como o NDVI, foram usados para estimar a biomassa de pastagem, no entanto, estes índices apresentam limitações quando a vegetação está com alta densidade, pois saturam. Os mesmos autores mencionaram que, quando há alta densidade do dossel, a biomassa de pastagem pode ser estimada pelos comprimentos de ondas localizados na região do red-edge, pois são mais precisos do que NDVI padrão.

Este problema da saturação do NDVI pode ser explicado por meio do USGS (2015), que menciona que o NDVI possui uma escala de valores que variam de -1 a 1, sendo que, os maiores valores entre 0,6 a 0,9 apresentam uma vegetação mais densa. Contudo, Huete et al. (2002) relatam que este índice começa a perder sua sensibilidade quando a vegetação se torna mais densa.

Os pontos fora de controle podem ser justificados pelos fatores que interferem na reflectância da folha, nos quais, Gates et al. (1965) citam os espaços ocupados pelo ar e pela água, pigmentos e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente. Gausman (1973) relata outros fatores, tais como, idade da folha, condição de iluminação, maturação, conteúdo de água, senescência, posição nodal e pubescência.

Para Bernardes (1987), os fatores estão relacionados na absorção da radiação solar e na interceptação podem ser classificados em: fisiológicos (caráter funcional, ou seja, idade da planta, nutrientes e conteúdo de água na folha) e morfológicos (relacionados à organização espacial das folhas, isto é, ângulo de inserção foliar, distribuição vertical e horizontal de folhas, densidade de cobertura vegetal).

## Conclusões

O tempo ótimo de leituras dos sensores de dossel, principalmente com o índice NDRE, foram aos 45 e 60 DAS (estádio V5 e V6 da soja) devido as melhores correlações entre os indicadores de qualidade (índices de vegetação vs. biomassa fresca e seca, largura de dossel, índice de clorofila, produtividade e maturação).

O NDRE apresentou ao longo dos estádios de desenvolvimento maior qualidade do processo devido a sua menor variabilidade comparado ao NDVI e IRVI, e ainda apresentou os menores valores dos coeficientes de variação e dispersão.

## Referências

- Abdel-Rahman, E. M., & Ahmed, F. B. (2008). The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13), 3753-3767. doi:10.1080/01431160701874603
- Ag Leader Technology. (2011). Precision Point Blog. <http://www.agleader.com/blog/optrx-crop-sensors-a-tech-support-perspective/>. Accessed 13 September 2017.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. de M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Amaral, L. R. do, & Molin, J. P. (2014). The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. *Agronomy Journal*, 106(1), 273-280.
- Amaral, L. R., Molin, J. P., Portz, G., Finazzi, F. B., & Cortinove, L. (2015). Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 16(1), 15–28. doi: 10.1007/s11119-014-9377-2.
- Barbetta, P. A., Reis, M. M., Bornia, A. C. (2014). *Estatística para cursos de engenharia e informática*. 2.ed. São Paulo, SP: Atlas. 410p.
- Bernardes, M. S. (1987). Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: Castro, P. R. *Ecologia da produção agrícola*. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 249p.

- Bertolin, D. C., Sá, M. E. de, Arf, O., Furlani Junior, E., Colombo, A. de S., & Carvalho, F. L. B. M. de. (2010). Aumento da produtividade de soja com a aplicação de bioestimulantes. *Bragantia*, 69(2), 339-347.
- Bolfe, E. L., Batistella, M., & Ferreira, M. C. (2012). Correlação de variáveis espectrais e estoque de carbono da biomassa aérea de sistemas agroflorestais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(9), 1261-1269.
- Bunchaft, G., & Kellner, S. R. de O. (2002). *Estatística sem mistérios*. 4.ed. Petrópolis, RJ: Vozes. 2, 303p.
- Buschmann, C., & Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 711–722. doi:10.1080/01431169308904370
- Cao, Q., Miao, Y., Feng, G., Gao, X., Li, F., Liu, B., et al. (2015). Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112, 54–67. doi:10.1016/j.compag.2014.08.012
- Cao, Q., Miao, Y., Shen, J., Yu, W., Yuan F., Cheng, S. et al. (2016). Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. *Precision Agriculture*, 17(2), 136–154. doi:10.1007/s11119-015-9412-y
- Carneiro, F. M., Zerbato, C., Menezes, P. C., Girio, L. A. S., Oliveira, M. F., & Furlani, C. E. A. (2017). Sensoriamento Terrestre. *Revista Cultivar Máquinas*, 15, 20-21.
- Ciampitti, I.; Shoup, D.; & Duncan, S. (2014). *Late planting of soybeans: Management considerations*. [https://webapp.agron.ksu.edu/agr\\_social/eu\\_article.throck?article\\_id=1429](https://webapp.agron.ksu.edu/agr_social/eu_article.throck?article_id=1429). Accessed 31 May 2018.
- Chioderoli, C. A., Silva, R. P. da, Noronha, R. H. de F., Cassia, M. T., & Santos, E. P. dos. (2012). Perdas de grãos e distribuição de palha na colheita mecanizada de soja. *Bragantia*, 71(1), 112-121. doi: 10.1590/S0006-87052012005000003.
- Cruz, C. D., & Regazzi, A. J. (1997). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. 2.ed. Viçosa, MG: UFV. 390p.
- Cruz, C. D.; & Carneiro, P. C. S. (2003). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa, MG: UFV. 585p.

- Eitel, J. U., Keefe, R.F., Long, D. S., Davis, A. S., & Vierling, L. A. (2010). Active ground optical remote sensing for improved monitoring of seedling stress in nurseries. *Sensors (Basel Switzerland)* 10(4), 2843–2850. doi:10.3390/s100402843
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2013). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, 3rd ed. Rev. ampl., Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). 353pp.
- Embratop. Receptor GPS Trimble R6 (L1/L2). 2017. <http://www.embratop.com.br/produto/receptor-gps-trimble-r6-11-12/>. Accessed 30 November 2017.
- Ferreira, D. F. (2009). *Estatística básica*. 2.ed. Lavras, MG: UFLA. 664pp.
- Ferri, C. P. (2002). *Utilização da reflectância espectral para a estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [Gycine max (L.), Merrill]*. 173p. (INPE-8983-TDI/814). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Figueiredo Filho, D. B., & Silva, J. A. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18, 115-146.
- Fisher, M. J., & Marshall, A. P. (2009). Understanding descriptive statistics. *Australian Critical Care*, 22, 93-97.
- Fitzgerald, G. J., Rodriguez, D., Christensen, L. K., Belford, R., Sadras, V. O., & Clarke, T. R. (2006). Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agriculture*, 7, 233–248. doi:10.1007/s11119-006-9011-z
- Galarça, S. P., Lima, C. S. M., Silveira, G. da, & Rufato, A. de R. (2010). Correlação de pearson e análise de trilha identificando variáveis para caracterizar porta-enxerto de *Pyrus communis* L. *Ciência e Agrotecnologia*, 34(4), 860-869. doi:10.1590/S1413-70542010000400010
- Galvão, L. S., Ponzoni, F. J., Epiphanyo, J. C. N., Formaggio, A. R., & Rudorff, B. F. T. (2004a). Sun and view angle effects on NDVI determination of land cover types in the Brazilian Amazon region with hyperspectral data. *International Journal of remote sensing*, 25(10): 1861-1879. doi:10.1080/01431160310001598908

- Galvão, L. S.; Almeida-Filho, R.; Vitorello, I. (2004b). Spectral discrimination of hydrothermally altered-materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(2), 107-114. doi:10.1016/j.jag.2004.12.003
- Galvão, L. S., Formaggio, A. R., & Tisot, D. A. (2005). Discriminação de variedades de cana-de-açúcar com dados hiperespectrais do sensor Hyperion/EO-1. *Revista Brasileira de Cartografia*, 57(1), 7-14.
- Galvão, L. S.; Formaggio, A.; Tisot, D. A. The influence of spectral resolution on discriminating Brazilian sugarcane varieties. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4): 769-777, 2006. doi:10.1080/01431160500166011
- Gates, D. M., Keegan, H. J., Chleter, J. C., & Weidner, V. R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4(1), 11-20. doi:10.1364/AO.4.000011
- Gausman, H. W., & Allen, W. A. (1973). Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant Physiology*, 52(1), 57-62.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Lichtenthaler, H. K. (1996). Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiology*. 148, 501–508. doi:10.1016/S0176-1617(96)80285-9.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Verma, S. B., Rundquist, D. C., Arkebauer, T. J., Keydan, G. et al. (2006). Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research*. 111. doi:10.1029/2005JD006017.
- Gleriani, J. M. (1994). *Influência do solo e de fundo e da geometria da radiação na resposta espectral da cultura do feijão*. 87p. (INPE-5632-TDI/556). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Gnyp, M. L., Miao, Y., Yuan, F., Ustin, S. L., Yu, K., Yao, Y. et al. (2014). Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. *Field Crops Research*, 155, 42–55. doi:10.1016/j.fcr.2013.09.023

- Gobbi, K. F., Garcia, R.; Garcez Neto, A. F.; Pereira, O. G.; Ventrella, M. C., & Rocha, G. C. (2009). Características morfológicas, estruturais e produtividade do capim-braquiária e do amendoim forrageiro submetidos ao sombreamento. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(9), 1645-1654. doi:10.1590/S1516-35982009000900002
- Grohs, D. S., Bredemeier, C., Mundstock, C. M., & Poletto, N. (2009). Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. *Engenharia Agrícola*, 29(1), 101-112. doi:10.1590/S0100-69162009000100011
- Grohs, D. S., Bredemeier, C., Poletto, N., & Mundstock, C. M. (2011). Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(4), 446-449. doi:10.1590/S0100-204X2011000400015
- Guyot, G., Hanocq, J. F., Lepne, T., Malet, P., & Verbrugge, M. (1984). Étude des potentialities de SPOT pour suivre la evolution de couverts de céréales. *L'Espace Geographique*, 3, 257-264.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (2005). *Análise multivariada de dados*. 5.ed. Porto Alegre, RS: Bookman. 593p.
- Hansen, P., & Schjoerring, J. (2003). Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86(4), 542–553. doi:10.1016/S0034-4257(03)00131-7
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2010). Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. *Remote Sensing*, 2(2), 562-578. doi:10.3390/rs2020562
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195–213. doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- Jensen, J. R. (2011). *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2. ed. São José dos Campos, SP: Parênteses. 598 p. Tradução de: Epiphânio, J. C. N.; Formaggio, A. R., Santos, A. R. dos, Rudorff, B. F. T., Almeida, C. M. de, & Galvão, L. S.

- Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, techniques and applications*. Oxford: Oxford University Press. 353 pp.
- Kazmier, L. J. (2007). *Estatística aplicada à administração e economia*. 4.ed. Porto Alegre, RS: Bookman. 392pp.
- Kapp Júnior, C., Guimarães, A. M., & Caires, E. F. (2016). Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. *Engenharia Agrícola*, 36(5), 886-894. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p886-894/2016
- Kimes, D. S. (1983). Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*, 22(9), 1364-1372. doi:10.1364/AO.22.001364
- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Scharf, P. C., Palm, H. L., Roberts, D. F., & Vories, E. D. (2010). Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. *Agronomy Journal*, 102(1), 71–84. doi:10.2134/agronj2009.0114
- Kumar, R., & Silva, L. (1973). Light ray tracing through a leaf cross section. *Applied Optics*, 12, 2950–2954. doi:10.1364/AO.12.002950
- Li, F., Miao, Y., Chen, X., Zhang, H., Jia, L., & Bareth, G. (2010a). Estimating winter wheat biomass and nitrogen status using an active crop sensor. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 16(6), 1221–1230.
- Li, F., Miao, Y., Henning, S. D., Gnyp, M. L., Chen, X., JIA, L. et al. (2010b). Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. *Precision Agriculture*, 11(4), 335-357. doi:10.1007/s11119-010-9165-6
- Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X. et al. (2014). Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 157, 111–123. doi:10.1016/j.fcr.2013.12.018
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). *Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV–vis Spectroscopy*, Current Protocols in Food Analytical Chemistry. New York, NY: John Wiley and Sons, pp. F4.3.1–F4.3.8.

- Lofton, J., Tubana, B. S., Kanke, Y., Teboh, J., Viator, H., & Dalen, M. (2012). Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors (Basel Switzerland)*, 12(6), 7529–7547. doi:10.3390/s120607529
- Luiz, A. J. B., & Epiphanyo, J. C. N. (2001). Amostragem por pontos em imagens de sensoriamento remoto para estimativa de área plantada por município. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2001, p.111-118. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1. (INPE-8212-PRE/4001).
- Ma, B. L., Dwyer, L. M., Costa, C., Cober, E. R., & Morrison, M. J. (2001). Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal*, 93(6), 1227–1234. doi:10.2134/agronj2001.1227
- Martins, G. D., & Galo, M. de L. B. T. (2015). Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21(4), 783-796. doi:10.1590/S1982-21702015000400046
- Minitab 18. *Suporte ao Minitab 18*: Distribuição normal. 2017. <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/normal-distribution/>. Accessed 02 October 2017.
- Miller, J. J., Schepers, J. S., Shapiro, C. A., Arneson, N. J., Eskridge, K. M., Oliveira, M. C. et al. (2018). Characterizing soybean vigor and productivity using multiple crop canopy sensor readings. *Field Crops Research*, 216, 22–31. doi:10.1016/j.fcr.2017.11.006
- Moldan, B. (2015). *Podmaněná planeta. Karolinum*. Praha, 511p. (in Czech).
- Molin, J. P.; Amaral, L. R.; Colaço, A. F. (2015). Sensoriamento e sensores. In: Molin, J. P.; Amaral, L. R.; Colaço, A. F. *Agricultura de precisão* (cap. 5, pp. 119-153). São Paulo, SP: Oficina de Textos.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*. Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc., 6 ed. 754pp.

- Moreira, M. A. (2011). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 4 ed. atual. e ampl. Viçosa, MG: Ed. UFV. 422pp.
- Motomiya, A. V. A., Molin, J. P., & Chiavegato, E. J. (2009). Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(2), 137–145. doi:10.1590/S1415-43662009000200005
- Motomiya, A. V. A., Valente, I. M. Q., Molin, J. P., Motomiya, W. R., Biscaro, G. A., & Jordan, R. A. (2014). Índice de vegetação no algodoeiro sob diferentes doses de nitrogênio e regulador de crescimento. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(1), 169-178. doi:10.5433/1679-0359.2014v35n1p169
- Mourtzinis, S.; Rowntree, S. C.; Suhre, J. J.; Weidenbenner, N. H.; Wilson, E. W.; Davis, V. M. et al. (2014). The use of reflectance data for in-season soybean yield prediction. *Agronomy Journal*, 106(4), 1159-1168. doi:10.2134/agronj13.0577
- Mutanga, O., & Skidmore, A. K. (2004). Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation *International Journal of Remote Sensing*, 25(19), 3999–4014.
- Novo, E. M. L. de M. (2008). *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 3 ed. rev. ampl. São Paulo, SP: Blucher. 362p.
- Pérez-Vicente, S., & Ruiz, M. Expósito. (2009). Descriptive statistics. *Allergologia et Immunopathologia*, 37(6), 314-320. doi:10.1016/j.aller.2009.10.005
- Portz, G., Molin, J. P., & Jasper, J. (2012). Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precision Agriculture*, 13(1), 33–44. doi:10.1007/s11119-011-9243-4
- Povh, F. P.; Molin, J. P.; Gimenez, L. M.; Pauletti, V.; Molin, R.; Salvi, J. V. (2008). Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(8), 1075-1083. doi:10.1590/S0100-204X2008000800018
- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E. et al. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1), 131–138. doi:10.2134/agronj2001.931131x

- Raun, W. R., Solie, J. B., Stone, M. L., Martin, K. L., Freeman, K. W., Mullen, R. W., et al. (2005). Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(19-20), 2759–2781. doi:10.1080/00103620500303988
- Reis E. A., & Reis, I. A. (2002). *Análise Descritiva de Dados*. Departamento de Estatística, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas: Belo Horizonte, 64 p. Disponível em: <<http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/rte0202.pdf>>. Acesso em: 8 jan. 2018.
- Richards, J. A. (1993). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 340pp.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In *Third earth resources technology satellite-1 symposium* (1, pp. 309–330).
- Rudorff, B. F. T., Aguiar, D. A., Silva, W. F., Sugawara, L. M., Goltz, E., Aulicino, T. L. I. N., et al. (2010). *Uso de imagens de satélites de sensoriamento remoto para mapear a área cultivada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo - safra 2009/10*. São José dos Campos, SP: INPE, 46 pp.
- Shiratsuchi, L. S., Brandão, Z. N., Vicente, L. E., Victoria, D. de C., Ducati, J. R., Oliveira, R. P. de, et al. (2014). Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: Bernardi, A. C. de C.; Naime, J. de M.; Resende, A. V. de; Basso, L. H.; Inamasu, R. Y. *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar* (cap. 4, pp. 58-73). Brasília, DF: Embrapa.
- Silva, V. F. A. (2013). *Mobilização do solo e desempenho operacional de semeadora-adubadora com dois tipos de hastes sulcadoras em plantio direto de milho*. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Produção Vegetal, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- Stevenson, W. J. (2001). *Estatística aplicada à administração*. São Paulo, SP: Harbra. 495p.
- Taskos, D. G., Koundouras, S., Stamatiadis, S., Zioziou, E., Nikolaou, N., Karakioulakis, K., et al. (2015). Using active canopy sensors and chlorophyll meters to estimate grapevine nitrogen status and productivity. *Precision Agriculture*, 16(1), 77–98. doi:10.1007/s11119-014-9363-8

- Teal, R. K., Tubana, B., Girma, K., Freeman, K. W., Arnall, D. B., Walsh, O., et al. (2006). In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agronomy Journal*, 98:1488–1494. doi:10.2134/agronj2006.0103
- Thenkabail, P., Smith, R. B., De Pauw, E. (2000). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71(2), 158–182. doi:10.1016/S0034-4257(99)00067-X
- Toledo, A., Tabile, R. A., Silva, R. P. da, Furlani, C. E. A., Magalhães, S. C., Costa, B. O. (2008). Caracterização das perdas e distribuição de cobertura vegetal em colheita mecanizada de soja. *Engenharia Agrícola*, 28(4), 710-719. doi:10.1590/S0100-69162008000400011
- Trimble - Transforming the Way the World Works.2013. *Especificações técnicas*. <http://www.geodata.eng.br/manuais/gps/trimble/R6.pdf>. Accessed 29 November 2017.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division. (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*. New York: United Nations, 59 pp.
- USGS - United States Geological Survey. (2015). *NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology*. United States Geological Survey. [https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi\\_foundation.php](https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php). Accessed 31 May 2018.
- Valeriano, M. M. (1992). *Reflectância espectral do trigo irrigado (Triticum aestivum, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL*. 1992-05. 149p. (INPE-5426-TDI/483). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Van Niel, T. G., & McVicar, T. R. (2004). Current and potential uses of optical remote sensing in rice-based irrigation systems: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(2), 155–185. doi:10.1071/AR03149
- Voltarelli, M. A., Silva, R. P. da, Cassia, M. T., Ortiz, D. F., & Torres, L. S. (2015). Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar utilizando-se de três modelos de facas. *Engenharia Agrícola*, 35(3), 528-541. doi:10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p528-541/2015

Zhang, Q. (2015). *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. CRC Press, 360 pp.

Zerbato, C., Cavichioli, F. A., Raveli, M. B., Marrafon, M., & Silva, R. P. da. (2013). Controle Estatístico de Processo aplicado à colheita mecanizada de milho. *Engenharia na agricultura*, 21(3), 261-270.

## **CAPÍTULO 4 – Comportamento dos índices de vegetação para as culturas de soja e amendoim**

**RESUMO** - O Sensoriamento Remoto possui técnicas que possibilitam o monitoramento agrícola de forma rápida, precisa e é um método não-destrutivo, proporcionando o monitoramento da cultura em vários estádios de crescimento. Assim, facilita o maior conhecimento e entendimento do comportamento espectral entre as culturas e permite identificar os tempos ótimos de leitura. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) com a biomassa fresca e seca, o índice de clorofila e a produtividade para a cultura da soja e do amendoim, como também, verificar a evolução destes índices por meio do estágio de desenvolvimento das culturas. Os experimentos foram realizados na safra de 2016/17, para o estudo do comportamento espectral das culturas da soja e do amendoim como também da variabilidade temporal dos índices de vegetação, em áreas agrícolas nos municípios de Dumont e de Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil. O delineamento experimental dos experimentos foi baseado no Controle Estatístico de Qualidade – CEQ. Nos experimentos de amendoim e da soja apresentaram 63 e 65 pontos amostrais, respectivamente, com GRID 30 x 30 m. As avaliações foram realizadas aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS), correspondendo desde o estágio vegetativo das culturas até o R6, por meio do sensoriamento remoto a nível de coleta terrestre com a utilização de dois sensores ópticos ativos ou de dossel (GreenSeeker e OptRX) para a análise do comportamento dos indicadores de qualidade, como a biomassa fresca e seca, índice de clorofila, produtividade e os índices de vegetação (NDVI e NDRE). Os índices de vegetação NDRE e NDVI apresentaram alto potencial para a detecção no monitoramento das culturas da soja e do amendoim durante o estágio de desenvolvimento. Principalmente o NDRE por ser menos sensível a saturação da sua leitura com o incremento da biomassa. O tempo ótimo de leitura de acordo com as análises de correlação e regressão apresentaram que aos 45 e 60 DAS (estádio de desenvolvimento R1 e R2 do amendoim, e da soja V5 e V6) mostraram os melhores valores. Houve interferências entre as culturas nas leituras dos sensores por terem comportamento espectral diferente em virtude da morfologia e fisiologia vegetal se diferirem.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, índices de vegetação, sensores de dossel

### **Behavior of vegetation indexes for soybean and peanut crops**

**ABSTRACT** – The remote Sensing has techniques that enable in quickly crop monitoring, accurate and non-destructive way, providing crop growth monitoring at various stages of growth. Thus, it facilitates the greater knowledge and understanding of the spectral behavior between the crops and allows to identify the optimal times for reading. The objective of this work was to evaluate the behavior of vegetation indices (NDVI and NDRE) with fresh and dry biomass, chlorophyll index and productivity for soybean and peanut crop, as well as verify the evolution of these indices by means of

growth stages. The experiments were performed on the 2016/17 season to study the spectral behavior of the soybean and peanut crops as well as the temporal variability of vegetation indices in agricultural areas in the municipalities of Dumont (21°15'22.05 "S and 47°58'15.00"W) and Jaboticabal (21°15'19.6"S and 48°15'38.5"W), in the state of São Paulo, Brazil. The design of experiments was based on the basic assumptions of the Statistical Quality Control – SQC, containing 63 and 65 sample points with GRID 30 x 30 m. The parameters were evaluated at 30, 45, 60, 75, and 90 days after sowing (DAS), from vegetative stages to R6, by means of proximal sensing using the GreenSeeker and OptRX sensors for the analysis of the behavior of quality indicators, such as fresh and dry biomass, chlorophyll index, yield and vegetation indices (NDVI and NDRE). The NDRE and NDVI presented high potential for detection and monitoring of soybean and peanut crops during the growth stage. Especially NDRE because it is less sensitive to the saturation reading with the increase of the biomass. The optimal reading time according to the correlation and regression analyzes showed that at 45 and 60 DAS (peanut development stages R1 and R2, and soybean V5 and V6) showed the best values. There were interferences between crops in the sensor readings because they presented different spectral behavior because of physiological and morphological plant if they differ.

**Keywords:** remote sensing, vegetation indexes, canopy sensors.

## INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira vem apresentando há anos sucesso incontestável, sustentando níveis positivos na balança comercial e sendo responsável por parte essencial do desempenho da economia nacional. Para obtenção destes níveis é necessário o avanço tecnológico e científico, associado aos aspectos de logística, gerenciamento, empreendedorismo, entre outros, especialmente em um mundo competitivo e globalizado, tem que ser contínuo (Epiphany, 2017).

A Agricultura de Precisão (AP) oferece vários benefícios potenciais em sustentabilidade, qualidade da cultura, rentabilidade, proteção ambiental, desenvolvimento econômico rural, segurança alimentar, da forma que a AP usa abordagens modernas e científicas integradas as tecnologias de informação para uma produção agrícola inteligente e aos conhecimentos tradicionais (Shiratsuchi et al., 2014). De acordo com Zhang (2015) e United Nations (2015) nas últimas décadas o conceito de Agricultura de Precisão (AP) se desenvolveu indispensavelmente em virtude do aumento do crescimento populacional.

Assim, por meio das técnicas de Sensoriamento Remoto obtêm-se informações da lavoura por vezes à distância, de forma rápida e não-destrutiva, e têm se tornado

importante no tratamento dos dados de campo e na sua obtenção, tais como, avaliação nutricional, previsão do tempo, detecção de doenças e pragas, avaliação da necessidade hídrica das plantas, estimativa da produtividade (Shiratsuchi et al., 2014).

O Sensoriamento Remoto tornou-se ferramenta relevante para o monitoramento agrícola, especialmente por possibilitar o acompanhamento da cultura no decorrer dos estádios de crescimento, determinação tanto da produtividade agrícola e como de novas áreas de cultivo como também estimativas de safra (Rudorff, 2010).

Brandão (2009) relatou que por meio do Sensoriamento Remoto muitas aplicações podem ser abordadas, dentre elas, destaca-se: a avaliação do estágio fenológico, estimativa da produtividade e da biomassa da cultura, e o monitoramento do vigor das plantas e de estresse hídrico.

Sensoriamento Remoto é a tecnologia que possibilita a obtenção de imagens, e outros tipos de dados, da superfície terrestre por meio da coleta e armazenamento da energia emitida ou refletida pela superfície, sendo que o termo sensoriamento significa à obtenção de dados por meio de sensores instalados em plataformas orbitais (satélites artificiais), aéreas (aeronaves e balões) e terrestres, e para o termo remoto refere-se a distância sem que haja o contato físico entre os objetos na superfície terrestre e o sensor. A análise, processamento e interpretação desses dados também fazem parte do Sensoriamento Remoto que é considerado como uma ciência (Florenzano, 2011; Jensen, 2009).

Os dados da reflectância estão relacionados com as características das plantas, bem como, a fração radiativa interceptada fotossinteticamente ou a biomassa e o índice de área foliar. Na agricultura, as propriedades da reflectância em cada região do espectro eletromagnético podem ser melhor analisadas por meio de combinações matemáticas utilizando bandas espectrais (Atzberger, 2013), e essas transformações são medidas obtidas pela atividade da vegetação por meio da região do infravermelho próximo (NIR – Near Infrared) e do visível que são conhecidas como índices de vegetação - IV (Shiratsuchi et al., 2014).

O conhecimento do comportamento espectral do alvo é muito importante para a geração de informações desde a análise quantitativa e para a interpretação das imagens orbitais (Melendez-Pastor et al., 2008).

Os parâmetros responsáveis pelo comportamento espectral em relação ao dossel da vegetação são: natureza espectral (solo e outros elementos da vegetação) e geométrica (ângulo de visada e iluminação) além de atributos biofísicos dos dosséis (distribuição angular foliar e índice de área foliar) (Ponzoni, 2001).

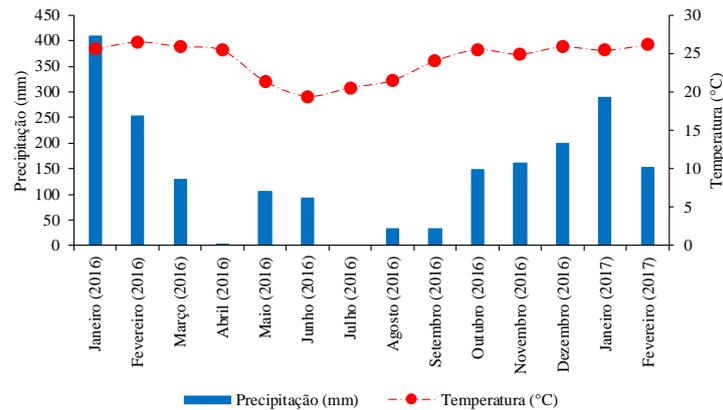
O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) com a biomassa fresca e seca, o índice de clorofila e a produtividade para a cultura da soja e do amendoim, como também, verificar a evolução destes índices por meio do estágio de desenvolvimento das culturas.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os experimentos foram realizados na safra 2016/17, para o estudo do comportamento espectral das culturas como também da variabilidade temporal dos índices de vegetação, em áreas agrícolas nos municípios de Dumont (21°15'22.05 "S e 47°58'15.00"W) e de Jaboticabal (21°15'19.6"S e 48°15'38.5"W), estado de São Paulo, Brasil.

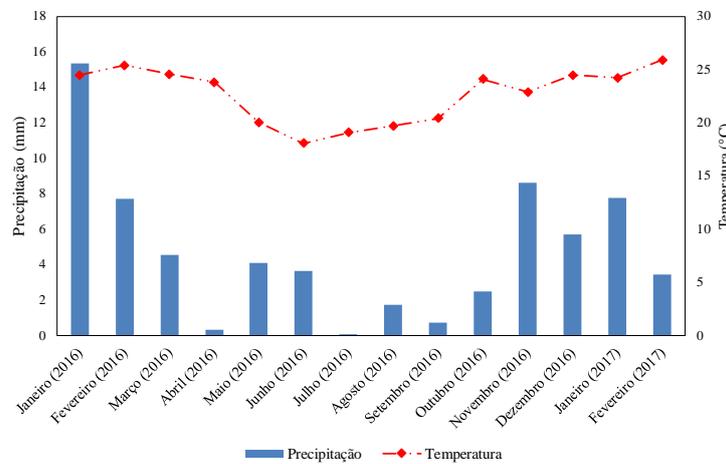
Quanto ao tipo de solo e ao clima foram os mesmos para ambas as áreas experimentais, sendo o tipo de solo das áreas, de acordo com a classificação da Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho. Em relação, ao clima conforme a classificação climática de Köppen é Aw (Alvares et al., 2013). Na Figura 1 observa-se os dados pluviométricos da área experimental de amendoim (A) e de soja (B), o período de condução do experimento foi realizado de outubro de 2016 a fevereiro de 2017.

A



Fonte: Fazenda Resfriado (precipitação) e The Weather Company (temperatura).

B



Fonte: Estação meteorológica da marca DAVIS do Laboratório de Instrumentação, Automação e Processamento do Departamento de Engenharia Rural, Unesp/Fcav, Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil

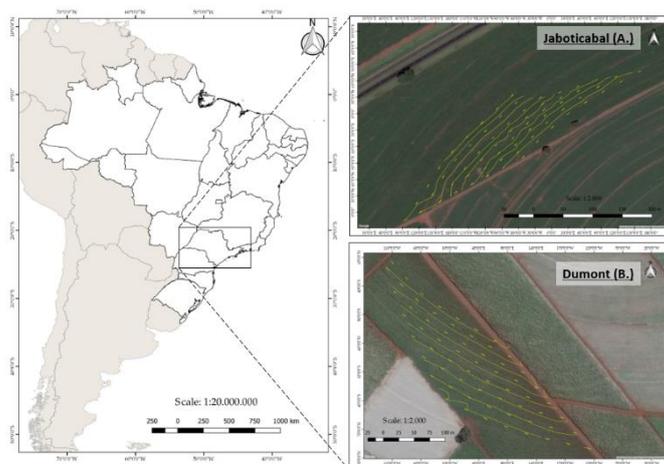
**Figura 1.** Dados pluviométricos obtidos pela média mensal da precipitação e temperatura de Dumont (A) e Jaboticabal (B), estado de São Paulo, Brasil.

A distribuição das chuvas durante os estádios de desenvolvimento das culturas é fundamental, como observado por Crusiol et al. (2017), alguns problemas em áreas de soja relacionados com a má distribuição de chuvas, ocasionou impacto negativo no agronegócio e na economia brasileira devido a produtividade ter sido afetada.

De acordo com o monitoramento agrícola agrometeorológico do CONAB/INMET (2017) de dezembro de 2016, foi verificado que nas regiões produtoras do Sudeste, Rondônia, Centro-Oeste e Pará o acúmulo de chuva para o mês de dezembro ficou abaixo da média, porém a distribuição espacial, a intensidade e a regularidade das precipitações foram favoráveis para o desenvolvimento das

lavouras e a manutenção da umidade do solo. Diante disso, os dados pluviométricos para o ano de 2017 para os experimentos apresentou-se adequados para o desenvolvimento das culturas (Figura 1).

Na Figura 2 observa-se a localização experimental dos experimentos. O experimento 1, realizado em Dumont (Figura 2B) situado nas coordenadas geográficas 21°15'22,05"S e 47°58'15,00", onde foi conduzindo a cultura do amendoim e o experimento 2, em Jaboticabal (Figura 2A) localizado nas coordenadas geográficas 21°15'19.6"S e 48°15'38.5"W.



**Figura 2.** Situação geográfica das áreas em estudo dos experimentos de soja (A.) e de amendoim (B.) nos municípios de Jaboticabal e Dumont, respectivamente, estado de São Paulo, Brasil.

O experimento possuiu 63 e 65 pontos amostrais, respectivamente, com GRID 30 x 30 m. As avaliações foram realizadas aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS), correspondendo desde o estágio vegetativo das culturas até o R6, por meio do sensoriamento remoto a nível de coleta terrestre com a utilização de dois sensores ópticos ativos (GreenSeeker e OptRX) para a análise do comportamento dos indicadores de qualidade, sendo: biomassa fresca e seca, índice de clorofila, produtividade e os índices de vegetação (NDVI e NDRE). Conforme Grohs et al., (2011), as leituras dos índices de vegetação foram realizadas sobre o dossel da planta com os sensores.

Os experimentos foram compostos por duas linhas com cinco metros de comprimento e espaçamento entre linhas de 0,90 e 0,45 m, perfazendo 9 m<sup>2</sup> e 4,5 m<sup>2</sup> de área útil por ponto, para a cultura do amendoim e soja, respectivamente. As

avaliações foram efetuadas em todas as parcelas/pontos amostras, monitorando a variabilidade temporal dos indicadores de qualidade, que foram considerados como indicadores, tais como, biomassa fresca e seca, índice de clorofila, produtividade e índices de vegetação.

Todos os pontos amostrais foram georreferenciados com o receptor GNSS Trimble R6, com antena de precisão, sistema GNSS, sinal de sinal de posicionamento RTK - Real Time Kinematic e antena de alta precisão, e receptor GPS integrado (Trimble, 2013; Embratop, 2017).

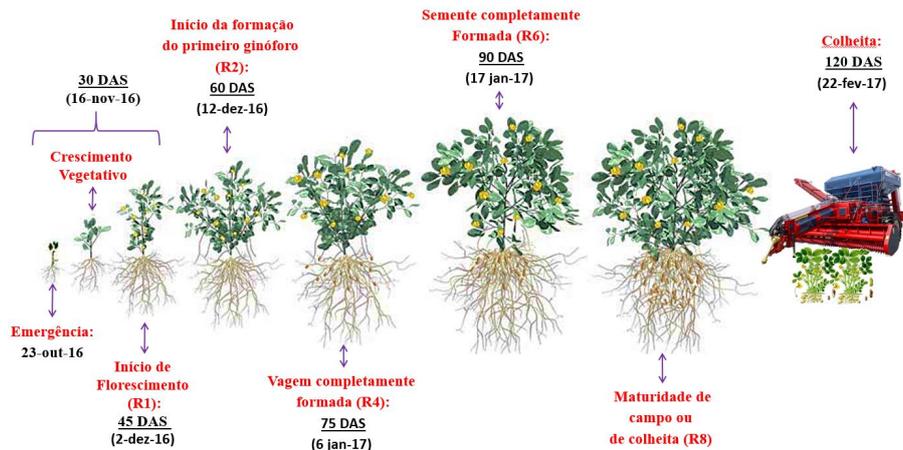
### **Equipamentos e implementos**

No experimento 1, os equipamentos utilizados para a semeadura do amendoim foram a semeadora Jumil, modelo JM2980 PD PANT (pantográfica), com espaçamento entre linhas de 0,90 m com 6 linhas de semeadura, que foi acoplada no trator John Deere, modelo 7195J, a densidade de semeadura foi de 22 sementes  $m^{-1}$  da cultivar Granoleico. No dia da semeadura a umidade do solo era de 14,79% na camada 0-20 cm. A adubação de semeadura foi de 220  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 05-37-00, e a de cobertura com 100  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 00-00-60.

No experimento 2, os equipamentos usados para a semeadura de soja foram a semeadora da Marchesan, modelo COP SUPREMA com espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de semeadura de 24 sementes  $m^{-1}$  da cultivar TMG 7060 IPRO, que foi acoplada ao trator da Massey Ferguson, modelo MF 7180. O solo apresentava 15,38% de umidade na camada de 0-20 cm, no dia da semeadura. Em relação, a adubação de semeadura foi utilizada 300  $kg\ ha^{-1}$  da formulação 04-20-20.

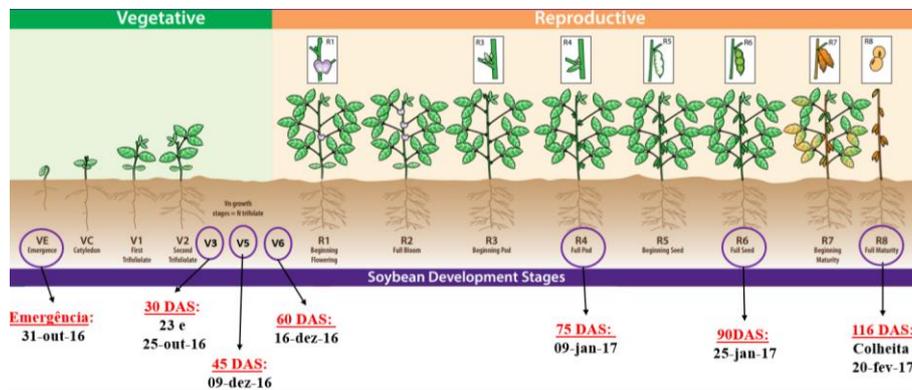
As avaliações foram realizadas aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura (DAS) que corresponderam aos estádios de desenvolvimento do amendoim e da soja, presentes na Figura 3.

A.



Fonte: Rural Liquid Fertilisers - RLF Global (2017), adaptado de Carneiro FM (2018).

B.



Fontes: Ciampitti I, Shoup D, Duncan S (2017) adaptado de Carneiro, FM (2018).

**Figura 3.** Estádio de desenvolvimento da cultura de amendoim (A.) e de soja (B.) destacando na figura os estádios que foram avaliados.

### Sensoriamento remoto com os sensores ativos de dossel

O GreenSeeker é um sensor óptico ativo, da Trimble, modelo 500. Este sensor emite uma luz eletromagnética com o comprimento de onda na faixa do infravermelho próximo – NIR (770 nm) e do vermelho (660 nm), e esse feixe de luz refletida pela planta é captada pelo sensor. No qual, o sensor calcula automaticamente o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (Motomiya et al., 2014; Amaral et al., 2015). Para este trabalho as leituras do sensor foram mantidas na altura de trabalho entre 0,6 e 0,7 m, sendo que o fabricante recomenda a altura entre 0,6 a 1,2 m.

Quanto ao OptRX é um sensor óptico ativo da Ag Leader, modelo ACS430. A empresa Ag Leader Technology (2011) menciona que esse sensor mede a

reflectância de algumas ondas eletromagnéticas específicas, permitindo ao sensor obter o índice de vegetação. Com esse sensor é possível obter os índices de vegetação NDRE e NDVI. Porém, nestes experimentos foi utilizado apenas o NDRE, pois o NDVI foi coletado pelo GreenSeeker. A leitura do sensor foi realizada com a altura de 0,60 a 0,70 m acima do dossel das plantas, o equipamento possui dois sensores que fazem a média de leitura em tempo real.

### Índice de vegetação

Os índices de vegetação avaliados neste trabalho foram obtidos pelos sensores de dossel GreenSeeker e o OptRX, obtendo os índices NDVI e NDRE, respectivamente. Na Tabela 1 observa-se o cálculo de cada índice.

**Tabela 1** Índices de vegetação e as citação correspondente.

Índice de vegetação	Cálculo do índice	Fonte
NDVI	$NDVI = \frac{F_{NIR} - F_{Red}}{F_{NIR} + F_{Red}}$	Rouse et al. (1973)
NDRE	$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$	Buschmann e Nagel (1993)

NDVI: Normalized Differential Vegetation Index, NIR: frações de emissão no infravermelho próximo, Red: frações de emissão do vermelho, NDRE: Normalized Difference Red Edge, RE: índices da taxa red-edge, NIR: 774 nm, Red: 656 nm, RE: 720 nm

O NDVI foi calculado pelas bandas do infravermelho (770 nm) e do vermelho (660 nm) (Povh et al., 2008), e o NDRE foi oriundo das bandas 790 e 720 nm (Fitzgerald et al., 2006).

### Parâmetros avaliados

As avaliações dos indicadores de qualidade índices de vegetação (NDVI e NDRE), biomassa fresca e seca, índice de clorofila e produtividade foram efetuadas em cada ponto amostral aos 30, 45, 60, 75 e 90 DAS correspondendo aos estádios de desenvolvimento desde o estágio vegetativo das culturas até o R6. Os parâmetros avaliados foram realizados da seguinte forma.

Biomassa fresca (“in natura”) e a seca: obtidas por meio de uma armação com 0,5 m<sup>2</sup> (0,5 x 0,5 m). Onde foi coletado 0,5 m de comprimento por linha, perfazendo 1 m por ponto amostral, nas duas linhas avaliadas. Após colocar as armações em cada

uma das duas linhas do ponto amostral, a planta foi cortada rente ao solo com auxílio de uma faca, aproveitando apenas a parte aérea do amendoim e as raízes não foram desconsideradas. As plantas coletadas foram colocadas em sacos de papel, posteriormente pesadas obtendo massa úmida (biomassa fresca). Depois foram colocadas em estufa com circulação na temperatura de 65°C por 72 h (Gobbi et al., 2009; Grohs et al., 2009). As amostras secas foram pesadas em uma balança semi-analítica (modelo BL 3200H) obtendo a massa seca (biomassa seca).

Índice de clorofila: obtido pelo clorofilômetro da Marcone, modelo CCM-200 plus, com precisão de  $\pm 1$  unidade CCI (Índice de Conteúdo de Clorofila). As leituras foram efetuadas aleatoriamente medindo 3 folhas por ponto amostral, onde em cada folha foram realizadas três leituras, com intuito de aumentar precisão.

Produtividade do amendoim foi utilizado armação com área de 2 m<sup>2</sup>. Onde foram coletadas as plantas, posteriormente colocando-as em sacos de rafia e depois levadas para serem trilhadas manualmente, obtendo as vagens que foram pesadas e os dados foram transformados kg ha<sup>-1</sup>.

Para a cultura da soja a produtividade de grãos foi obtida por meio da armação com área de 0,5 m<sup>2</sup>. As plantas foram cortadas rente ao solo e depois levadas para serem trilhadas em uma colhedora de parcelas combinadas da marca Wintersteiger Seedmech, modelo Nursey Mster Elite, obtendo grãos limpos onde foram pesados e os dados transformados em kg ha<sup>-1</sup> (Bertolin et al., 2010).

### **Análises estatísticas**

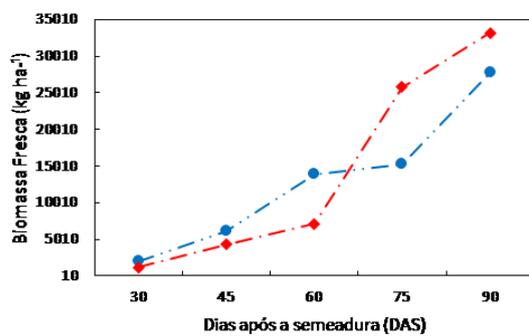
A partir dos dados coletados foram realizadas análises de regressão no modelo quadrático, sendo que as características biofísicas ficaram no eixo (y) e os índices de vegetação no eixo (x). Esta análise foi realizada para verificar o relacionamento entre as variáveis e a porcentagem de explicação dos índices de vegetação sobre a biomassa seca e fresca, índice de clorofila e produtividade.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O comportamento espectral das culturas ao longo do tempo pode ser observado na Figura 4, em que foram apresentadas as diferenças que aumentaram

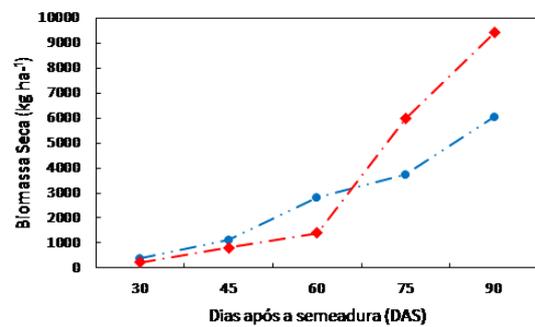
ao longo do estágio de desenvolvimento para as culturas da soja e amendoim, isto também foi observado por Filella e Peñuelas (1994) avaliando índice de clorofila e área foliar da pimenta e do feijão. Estas diferenças podem ser explicadas por Novo (2008), no qual verificou que o comportamento espectral da vegetação se altera durante o seu ciclo vegetativo, de forma que, o impacto das mudanças morfológicas e fenológicas ocorridas pelas plantas que compõem o dossel sobre o comportamento espectral varia em função do ângulo de visada; com a região do espectro; e com o tipo de cultura.

A.



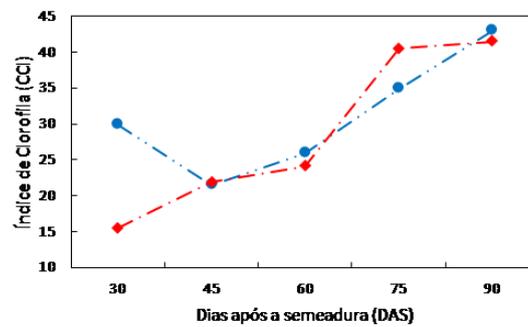
—●— Amendoim —◆— Soja

B.

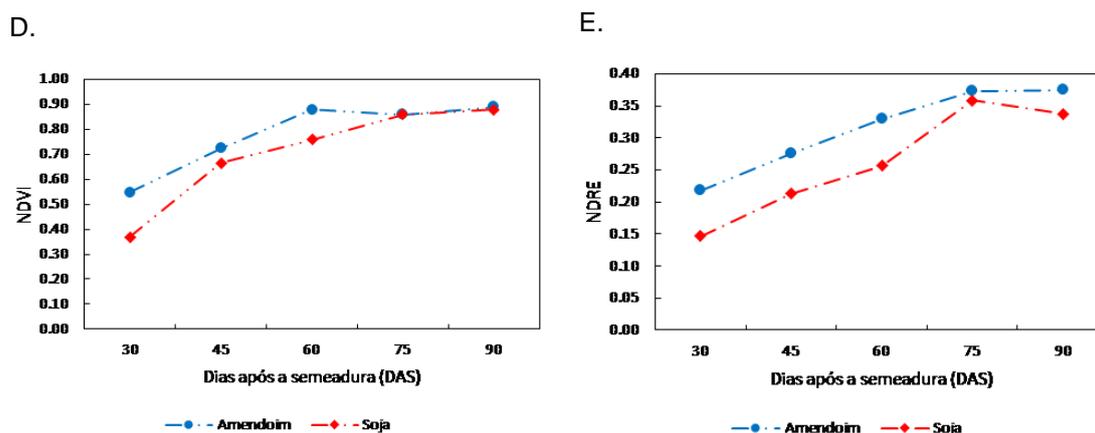


—●— Amendoim —◆— Soja

C.



—●— Amendoim —◆— Soja



**Figura 4.** Índice de clorofila, biomassa fresca e seca, e índice de vegetação NDVI e NDRE período durante o estágio de desenvolvimento da soja e do amendoim, correspondendo aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura – DAS.

Outros fatores que também podem afetar o comportamento espectral da vegetação: o tipo de substrato e a arquitetura do dossel da planta (Novo, 2008), sendo que, estes efeitos foram analisados por Antunes (1992) para a cultura da soja, baseado em modelos de simulação do Fator de Reflectância Bidirecional, visto que este comportamento espectral é sensível a reflectância do solo. Assim, Jensen (2011) diz que as principais variáveis que influenciam a função de distribuição de reflectância bidirecional de um dossel vegetativo, são: solo, vegetação, sensor, substrato e iluminação.

Formaggio e Sanches (2017) constataram que os fatores que influenciam nas respostas espectrais dos objetos sensoriados são devidas as interferências de observação e das geometrias de iluminação, a forma de como é coletado a radiação eletromagnética (bandas espectrais, sensores, plataformas), presença da atmosfera terrestre. Por isso, os autores dizem a importância do entendimento de como estes fatores interferem nas respostas espectrais, visando a otimização do uso dos dados obtidos.

Soja e amendoim obtiveram resultados distintos no ciclo vegetativo (Figura 4), por serem de espécies diferentes, e isso é explicado por Moreira (2011), em que as quantidades de energia refletida, absorvida ou transmitida pelas folhas das plantas podem distinguir dentro da própria espécie ou de uma para outra, pois os fatores ambientais que interferem indiretamente ou direta nesta interação. Ainda o autor cita

que a reflectância é muito influenciada pela morfologia das folhas que constituem o dossel da planta.

Em complemento aos resultados citados, Jensen (2011) relata que a distribuição espectral e a quantidade do fluxo radiante refletido pelo dossel da planta são afetados pelo tipo de vegetação presente, tais como, um estande de árvores devem refletir diferentemente quando comparado aos das gramíneas. Isto está relacionado com o recobrimento do solo pelo dossel da vegetação, Jensen (2011) cita que alguns dosséis que possuem menos de 100% de recobrimento do solo permitem que porções do solo reflitam a energia, no entanto, outros dosséis que apresentam 100% de fechamento, cobrindo totalmente o solo. Como é no caso deste trabalho a cultura do amendoim apresentou o fechamento do dossel no solo mais rápido do que a soja.

Quanto aos índices de vegetação, aos 75 DAS (estádio R4 de soja e do amendoim) houve saturação na leitura do NDVI para ambas as culturas devido ao incremento da biomassa. Assim como, Grohs et al. (2009) e Moges et al. (2004) observaram que a resposta do NDVI possui comportamento-padrão ao incremento da biomassa. Esta saturação foi verificada em vários trabalhos, tais como, Gitelson et al. (2003), Torino et al. (2014), Vinã et al. (2011), Delegido et al. (2013), Lu et al. (2017), Bonfil (2016) entre outros. Torino et al. (2014) observaram que as leituras do NDVI foram baixas quando comparado aos do NDRE para a predição da produtividade para a cultura do milho no estágio V10.

A desvantagem principal do NDVI é que possui relação não linear com as características biofísicas, bem como, índice de área foliar e biomassa (Myneni et al., 1995). Normalmente, o NDVI atinge saturação quando a biomassa apresenta média a alta quantidades como também para certos índices de área foliar (Gitelson et al., 2002), porém este efeito tende a ser mais proporcional a biomassa quando comparado aos outros índices de vegetação (Meneses et al., 2012).

Nos estádios de crescimento da soja V3 a V6 e do amendoim da emergência até início de florescimento à R2 (aos 30 a 60 DAS, respectivamente), os valores dos parâmetros biomassa fresca e seca, e índice de clorofila foram superiores para a cultura do amendoim em relação ao da soja. O amendoim por apresentar crescimento rasteiro possui maior largura do dossel do que ao da soja, por consequência, maior

recobrimento do solo por isso os valores de NDVI e NDRE também foram maiores para o amendoim. Este fato, da mesma forma foi observado por Novo (2008), como o dossel da soja não conseguiu recobrir completamente o substrato, houve uma diminuição da reflectância comparado ao do feijão, pois o substrato influenciou no comportamento espectral. Assim como, Nagler et al. (2000) relatam que trabalhos referentes a utilização de sensores remotos dizem que os elementos da superfície de fundo influenciam sobre as leituras de NDVI do dossel.

Pelas análises de regressão entre os índices de vegetação (NDVI e NDRE) com os parâmetros biofísicos foi observado na Tabela 2 os menores valores aos 30 DAS (estádio V3 da soja, e do amendoim da emergência até o início do florescimento), que pode ser explicado por Povh et al. (2008), estudando o comportamento do NDVI nas culturas de milho, cevada, trigo e triticale com diferentes níveis de nitrogênio (N), verificaram que nos estádios iniciais de desenvolvimento da planta devido ao baixo índice de área foliar, a presença de falhas na emergência das plantas e a influência do solo exposto na entrelinha, dificultou a diferenciação entre as doses de N. No entanto, o mesmo autor cita que com o melhor fechamento da cultura e maior desenvolvimento da parte aérea, proporciona obter dados com mais acurácia a variação de biomassa entre os tratamentos.

**Tabela 2.** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as relações entre os índices de vegetação NDVI, NDRE e biomassa fresca e seca, produtividade e índice de clorofila aos 30, 45, 60, 75 e 90 dias após a semeadura – DAS para a cultura de soja e amendoim ( $n = 65$  e  $63$ , respectivamente)

Variáveis	Soja - $R^2$			Amendoim - $R^2$	
	DAS	NDVI	NDRE	NDVI	NDRE
Biomassa Fresca (kg ha <sup>-1</sup> )	30	0,02 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>**</sup>	0,06 <sup>ns</sup>
	45	0,06 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>*</sup>	0,36 <sup>**</sup>	0,49 <sup>**</sup>
	60	0,16 <sup>**</sup>	0,17 <sup>**</sup>	0,12 <sup>*</sup>	0,16 <sup>**</sup>
	75	0,04 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>
	90	0,05 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
Biomassa Seca (kg ha <sup>-1</sup> )	30	0,02 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>
	45	0,09 <sup>*</sup>	0,12 <sup>*</sup>	0,21 <sup>**</sup>	0,40 <sup>**</sup>
	60	0,13 <sup>*</sup>	0,15 <sup>**</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>**</sup>
	75	0,06 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
	90	0,03 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	30	0,00 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>*</sup>
	45	0,00 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>*</sup>	0,10 <sup>*</sup>	0,09 <sup>ns</sup>
	60	0,00 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>*</sup>	0,13 <sup>*</sup>
	75	0,02 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>**</sup>	0,13 <sup>*</sup>
	90	0,03 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>**</sup>	0,11 <sup>*</sup>
Índice de clorofila (CCI)	30	0,05 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>
	45	0,10 <sup>*</sup>	0,17 <sup>**</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>**</sup>
	60	0,03 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
	75	0,04 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
	90	0,29 <sup>**</sup>	0,19 <sup>**</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>

<sup>\*\*</sup>Significativo a  $p < 0,01$ ; <sup>\*</sup>Significativo a  $p < 0,05$ ; <sup>ns</sup> Não significativo a  $p > 0,05$

As diferenças observadas na Tabela 2 nos valores de regressão entre as culturas, de acordo com Jensen (2011) ocorrem devido a diferença na umidade do solo, quanto ao espaçamento/orientações entre linha de semeadura, na biomassa, porcentagem de fechamento do dossel podem fazer com que uma cultura tenha propriedades de reflectância que diferem comparado a outra, em virtude da influência do solo.

Para o maior entendimento da diferença nos valores entre as culturas (Tabela 2), pode ser esclarecido em função da estrutura das folhas do amendoim que se difere ao da soja, pois a folha do amendoim possui maior cerosidade e menor dimensão em tamanho de área foliar em relação ao da soja. Além disso, na cultura da soja ocorre a mudança de cores das folhas de verde claro (no início do desenvolvimento), para verde-escuro (quando a planta está mais vigorosa) e no final do ciclo as folhas ficam amarronzadas, devido à ausência de cloroplasto e há maior presença de carotenos.

Enquanto, no amendoim não ocorre no final do ciclo da cultura a ausência dos cloroplastos, pois a folha permanece com a coloração verde. Colwell (1974) observou que os elementos vegetativos que mais influenciam no sinal detectado pelos sensores ópticos são as folhas.

Corroborando com o trabalho, Nagler et al. (2000) observaram que a soja possui tecidos celulares com menor conteúdo de celulose como também em dimensão do que ao resíduo do milho, de forma que, quando ocorre maior transmitância da radiação incidente, especialmente no vermelho, e menor no infravermelho próximo, havendo aumento do NDVI.

Como foi visto por Moreira (2011), nos estádios iniciais da cultura o dossel da planta está incompleto, devido à baixa porcentagem de cobertura vegetal do solo, de forma que, a energia refletida parte é proveniente da planta e a outra do solo, por isso os valores de NDVI e NDRE foram baixos aos 30 DAS no presente trabalho (estádio V3 da soja, e do amendoim da emergência até o início do florescimento). Jensen (2011) menciona que a quantidade de substrato presente se dá de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura.

Para os parâmetros avaliados os maiores valores observados na regressão foram no 45 e 60 DAS, devido ao estágio de desenvolvimento da cultura sendo considerado o tempo ótimo para a utilização dos sensores nas culturas, sendo que, o NDRE apresentou os maiores valores da regressão do que o NDVI. Resultado semelhante foi obtido por Shiratsuchi et al. (2010) em que os melhores resultados para a identificação do nível de nitrogênio no milho foram oriundos do NDRE em relação ao NDVI.

Como foi observado na Figura 3, o NDVI apresenta problema de saturação na leitura do sensor, isto também foi observado por Grohs et al. (2009), verificaram que os valores do NDVI aumentam com o incremento da biomassa até a sua saturação.

USGS (2015), explica o problema de saturação do NDVI por meio de uma escala que varia de -1 a 1, de modo que, os maiores valores (entre 0,6 a 0,9) demonstram uma vegetação mais densa. Para Liu (2006), 0,84 é o valor máximo de saturação do NDVI, obtendo este valor por meio do processamento de imagens orbitais.

O NDRE apresentou maiores valores de correlação com os parâmetros biofísicos da cultura em relação ao NDVI, pois o NDVI apresenta problema de saturação. Taskos et al. (2015) ao compararem o NDVI com o NDRE perceberam que o NDRE apresenta maior resistência ao problema de saturação.

Torino et al. (2014) avaliaram 11 índices de vegetação (NDVI, NDRE, SR, SR (RE), ISR, CI, MSR, entre outros) nos estádios iniciais de crescimento na cultura do milho e dentre estes índices perceberam que os dados obtidos pela banda red-edge foram mais precisos para estimar o potencial produtivo e o estado de nitrogênio da safra.

Mynemi et al. (2002) utilizaram o NDVI para análise de diferentes dosséis vegetativos e viram que quando atingiu a saturação não foi possível caracterizar as variações do dossel, e a diferenciar as áreas, e que pode estar correlacionada com a produtividade. Inman et al. (2005); Moges et al. (2004); Freeman et al. (2003) e Raun et al. (2001) realizaram análises semelhantes com NDVI utilizando diferentes lugares e culturas para estimar a produtividade.

Bonfil (2016), estudando a habilidade do NDVI e NDRE para diferenciar entre as cultivares de trigo durante o estágio de desenvolvimento e estimar a produtividade, sugeriu que o problema de limitação da saturação do NDVI pode ser superado por meio de contínuas medições.

Nas avaliações finais aos 90 DAS, correspondendo ao estágio R6 da soja e do amendoim os valores foram baixos devido ao estágio de desenvolvimento final da cultura. Em complemento com o resultado obtido neste trabalho Carvalho Júnior (2005) verificaram que quando a folha entra em processo de stress ou senescência ocorre diminuição na intensidade das bandas de absorção em  $0,45\mu\text{m} - 0,65\mu\text{m}$  com o aumento simultâneo da reflectância e a redução no teor de clorofilas, isso ocorre devido às alterações estruturais quando a folha perde umidade e a redução das feições de absorção da água.

## **CONCLUSÕES**

Os índices de vegetação NDRE e NDVI apresentaram alto potencial para a detecção no monitoramento das culturas da soja e do amendoim durante o estágio de

desenvolvimento. Principalmente o NDRE por ser menos sensível a saturação da sua leitura com o incremento da biomassa.

O tempo ótimo de leitura foram aos 45 e 60 DAS (estádio de desenvolvimento R1 e R2 do amendoim, e da soja V5 e V6).

Houve interferências entre as culturas para as leituras dos sensores, fato relacionado ao comportamento espectral diferente em virtude da morfologia e fisiologia vegetal se diferirem.

## REFERÊNCIAS

Ag Leader Technology. 2011. **Precision Point Blog**. Disponível em: <<http://www.agleader.com/blog/optrx-crop-sensors-a-tech-support-perspective/>>.

Acesso em 13 de set. 2017.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22: 711-728.

Amaral LR, Molin JP, Portz G, Finazzi FB, Cortinove L (2015) Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture** 16: 15–28.

Antunes MAH (1992) **Avaliação dos modelos Suits e Sail no estudo da reflectância da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Atzberger C (2013) Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing** 5: 949-981.

Bertolin DC, Sá ME, Arf O, Furlani Júnior E, Colombo AS, Carvalho FLBM (2010) Aumento da produtividade de soja com a aplicação de bioestimulantes. **Bragantia** 69: 339-347.

Brandão ZN, Bezerra MVC, Freire EC, Silva BB (2008) Agricultura de precisão para gerenciamento do algodão. In: Azevêdo DMP, Beltrão NEM. **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 1309 p. cap. 20. v. 2.

Brandão ZN (2009) **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Bonfil DJ (2016) Wheat phenomics in the field by RapidScan: NDVI vs. NDRE. **Israel Journal of Plant Sciences** 2-14.

Buschmann C, Nagel E (1993) In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. **International Journal of Remote Sensing** 14: 711–722.

Carvalho Júnior OA, Guimarães RF, Martins ES, Carvalho APF, Gomes RAT (2005) Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor aster em ambiente de cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica** 23(2): 159-172.

Crusiol LGT, Carvalho JFC et al. (2017) NDVI variation according to the time of measurement, sampling size, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. **Precision Agriculture** 18:470–490.

Colwell JE (1974) Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment** 3:175–183.

CONAB/INMET (2017) **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_01\\_11\\_11\\_30\\_39\\_boletim\\_gaos\\_janeiro\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_01_11_11_30_39_boletim_gaos_janeiro_2017.pdf)>. Acesso em: 18 mar. 2018.

Delegido J, Verrelst J, Meza CM, Rivera JP, Alonso L, Moreno J (2013) A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. **European Journal of Agronomy** 46:42–52.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Revista e ampliada**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Brasília: EMBRAPA, 353p.

EMBRATOP (2017) **Receptor GPS Trimble R6 (L1/L2)**. Disponível em: <<http://www.embratop.com.br/produto/receptor-gps-trimble-r6-l1-l2/>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

Epiphany JCN (2017) Apresentação. In: Formaggio, A. R.; Sanches, I. Del'Arco. **Sensoriamento Remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 284p.

Filella I, Penuelas J (1994) The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. **International Journal of Remote Sensing** 15: 1459–1470.

Fitzgerald GJ, Rodriguez D, Christensen LK, Belford R, Sadras VO, Clarke TR (2006) Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. **Precision Agriculture** 7:233–248.

Florenzano TG (2011) **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3 ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 128p.

Formaggio AR, Sanches IDel'A (2017) **Sensoriamento Remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 284p.

Freeman KW, Raun WR, Johnson GV, Mullen RW, Stone ML, Solie JB (2003) Late-season prediction of wheat grain yield and grain protein. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 34:1837-1852.

Gitelson AA, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D (2002) Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment** 80:76-87.

Gitelson AA, Viña A, Arkebauer TJ, Rundquist DC, Keydan G, Leavitt B (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letters** 30:1248–1253.

Gobbi KF, Garcia R, Garcez Neto AF, Pereira OG, Ventrella MC, Rocha GC (2009) Características morfológicas, estruturais e produtividade do capim-braquiária e do amendoim forrageiro submetidos ao sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia** 38:1645-1654.

Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N (2009) Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor GreenSeeker. **Engenharia Agrícola** 29:101-112.

Grohs DS, Bredemeier C, Poletto N, Mundstock CM (2011) Validação de modelo para predição do potencial produtivo de trigo com sensor óptico ativo. **Pesquisa agropecuária brasileira** 46:446-449.

Inman D, Khosla R, Mayfield T (2005) On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. **Sensor Review** 25:209-214.

Jensen JR (2009) **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 598p.

Jensen JR (2011) **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parênteses, 598p. Tradução de: Epiphânio, J. C. N.; Formaggio, A. R.; Santos, A. R. dos; Rudorff, B. F. T.; Almeida, C. M. de; Galvão, L. S.

Liu WTH (2006) **Aplicações de sensoriamento remoto**, 2nd ed.; UNIDERP: Campo Grande, 908p.

Lu J, Miao Y, Shi W, Li J, Yuan F (2017) Evaluating different approaches to non-destructive nitrogen status diagnosis of rice using portable RapidSCAN active canopy sensor. **Scientific Reports** 7:1-10.

Melendez-Pastor I, Navarro-Pedreño J, Gómez I, Koch M (2008) Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. **Geoderma** 147:126-132.

Meneses PR, Almeida T, Rosa ANCS, Sano EE, Souza EB, Baptista GMM, Brites RS (2012) **Introduction to processing of remote sensing images**. Brasília: UnB, pp 266.

Moges SM, Raun WR, Mullen RW, Freeman KW, Johnson GV, Solie JB (2004) Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition** 27:1431-1441.

Motomiya AVA, Valente IMQ, Molin JP, Motomiya WR, Biscaro GA, Jordan RA (2014) Índice de vegetação no algodoeiro sob diferentes doses de nitrogênio e regulador de crescimento. **Semina: Ciências Agrárias** 35:169-178.

Moreira MA (2011) **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 4. ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV, 422p.

Myneni RB, Hall FG, Sellers PJ, Marshak AL (1995) The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 33:481-486.

Myneni RB, Knyazikhin Y et al. (2002) Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment** 28:214-231.

Nagler PL, Daughtry CST, Goward SN (2000) Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment** 71:207-15.

Novo EMLM (2008) **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Ed. Blucher, 363p.

Povh FP, Molin JP, Gimenez LM, Pauletti V, Molin R, Salvi JV (2008) Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa agropecuária brasileira** 43:1075-1083.

Ponzoni FJ (2001) Comportamento espectral da vegetação. In: Meneses PR, Madeira Netto JS (Org.) **Sensoriamento remoto** – reflectância de alvos naturais. Brasília: Ed. UnB / EMBRAPA CERRADOS, 262 p.

Raun WR, Solie JB, Johnson GV, Stone ML, Ukina EV, Thomason WE, Schepers JS (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal** 93:131-138.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM. **Proceedings...** Washington: NASA, 1:309–330.

Rudorff BFT, Aguiar DA, Silva WF, Sugawara LM, Goltz E, Aulicino TLIN, Carvalho MA, Brandão D, Arenas-Toledo JM (2010) **Uso de imagens de satélites de sensoriamento remoto para mapear a área cultivada com cana-de-açúcar no estado de São Paulo - safra 2009/10**. São José dos Campos: INPE, 46 p.

Shiratsuchi LS, Ferguson RB, Shanahan JF, Adamchuk VI, Slater GP (2010) Comparison of spectral indices derived from active crop canopy sensors for assessing nitrogen and water status. In 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. **Anais...** Denver: CO.

Shiratsuchi LS, Brandão ZN, Vicente LE, Victoria DC, Ducati JR, Oliveira RP, Vilela MF (2014) Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão. In: Bernardi ACC, Naime JM, Resende AV, Bassoi LH, Inamasu RY. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: EMBRAPA. Cap. 4. p.58-73.

Taskos DG, Koundouras S, Stamatiadis S, Zioziou E, Nikolaou N, Karakioulakis K, Theodorou N (2015) Using active canopy sensors and chlorophyll meters to estimate grapevine nitrogen status and productivity. **Precision Agriculture** 16:77–98.

TRIMBLE - Transforming the Way the World Works.2013. **Especificações técnicas**. Disponível em: <<http://www.geodata.eng.br/manuais/gps/trimble/R6.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

Torino MS, Ortiz BV, Fulton JP, Balkcom KS, Wood CW (2014) Evaluation of vegetation indices for early assessment of corn status and yield potential in the southeastern united states. **Agronomy Journal** 106:1389-1401.

United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division (2015) **World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables**. New York: United Nations, 59 pp.

USGS (2015) **NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology**. United States Geological Survey, online: [https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi\\_foundation.php](https://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php) (accessed 20.1.2017).

Zhang Q (2015) **Precision Agriculture Technology for Crop Farming**. CRC Press, 360 pp.

## **CAPÍTULO 5 – Considerações finais**

Técnicas do Sensoriamento Remoto permitem ao agricultor o monitoramento temporal e espacial por meio da utilização de sensores. Por meio deste trabalho foi possível observar o tempo ótimo de leitura para o uso dos sensores ópticos ativos na lavoura para as culturas de soja e amendoim, pois os índices de vegetação detectam o potencial fisiológico da planta, isto é, quanto maior o valor do índice mais vigorosa a planta se encontra. Caso haja, baixos valores isso é indicativo de algum problema que deve ser verificado, como por exemplo, ataque de pragas e doenças, presença de nematoides, distribuição de fertilizantes se foi aplicado em déficit ou em excesso.

O tempo ótimo de leitura de acordo com as análises de correlação e regressão mostraram que aos 45 e 60 DAS (estádio de desenvolvimento R1 e R2 do amendoim, e da soja V5 e V6) foram os melhores valores.

O Controle Estatístico de Qualidade por meio das cartas de controle foi usado em dois capítulos da tese demonstrando grande potencial para o monitoramento da qualidade de leitura entre os índices de vegetação. Por meio das cartas de controle facilitou a visualização no momento que o NDVI apresenta o problema de saturação.

No monitoramento temporal das culturas por meio das cartas de controle, o NDRE obteve as melhores qualidades de leitura ao longo do processo comparado ao NDVI e IRVI.

Entre os índices avaliados o NDRE demonstrou os maiores valores de correlação entre as características biofísicas analisadas das culturas, indicando maior precisão em suas leituras. Porém, o NDVI com o incremento da biomassa apresentou problema de saturação com maior desenvolvimento das plantas, indicando que este índice deve ser usado no início de desenvolvimento da cultura, já o NDRE mostrou-se menos susceptível a saturação. Quanto o IRVI para as culturas estudadas demonstrou menos eficiente nas leituras quando comparado ao NDRE e NDVI.

Os índices de vegetação NDRE e NDVI apresentaram alto potencial para a detecção no monitoramento das culturas da soja e do amendoim durante o estágio de desenvolvimento. Principalmente o NDRE por ser menos sensível a saturação da sua leitura com o incremento da biomassa.

O NDRE apresentou ao longo dos estádios de desenvolvimento maior qualidade do processo devido a sua menor variabilidade comparado ao NDVI e IRVI, e ainda apresentou os menores valores dos coeficientes de variação e dispersão.

Diante disso, as técnicas do Sensoriamento Remoto são indicadas tanto para os produtores rurais quanto para a área acadêmica por facilitarem o maior conhecimento da variabilidade temporal da lavoura, por permite o uso dos sensores em vários estádios de desenvolvimento da cultura, por ser um método não destrutivo, rápido e preciso, redução de custo por proporciona a distribuição adequada de fertilizantes por taxa variável e criação de mapas de produtividade identificando as áreas com menos produtivas e conhecendo os possíveis fatores que estão afetando na sua produção.

Como neste trabalho foi realizado o Sensoriamento Remoto a nível de coleta terrestre, foi necessário a confecção de um suporte para a colocação do sensor óptico ativo (OptRx), neste caso o suporte foi a bicicleta, na qual sua construção foi baseada ao da Professora Doutora Brenda Ortiz da Universidade de Auburn, Alabama, Estados Unidos. Foi utilizado a bicicleta como suporte para a utilização do sensor desde a semeadura até a colheita.