



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**JOÃO ALMIRO CORREA SOARES**

**DETECÇÃO DE DOENÇAS E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM  
PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

**BELÉM-PA  
2020**

**JOÃO ALMIRO CORREA SOARES**

**DETECÇÃO DE DOENÇAS E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM  
PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Tese de Doutorado apresentada como requisito  
para obtenção do grau de Doutor em Agronomia.  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia da  
Universidade Federal Rural da Amazônia.  
Orientador: Prof. Titular Dr. Paulo Roberto Silva  
Farias

BELÉM-PA  
2020

Soares, João Almiro Corrêa

Detecção de doenças e estimativa da produtividade em plantações de Palma de óleo na Amazônia brasileira / João Almiro Corrêa Soares - Belém, 2020.

68 f.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGAGRO), Campus Universitário de Belém Universidade Federal Rural da Amazônia, 2020.

Orientação: Prof. Titular Dr. Paulo Roberto Silva Farias.

*1. Palma de óleo 2. Análise espectral 3. Índice de vegetação 4. Agricultura de precisão 5. Monitoramento agrícola.*

CDD – XXX.

**JOÃO ALMIRO CORREA SOARES**

**DETECÇÃO DE DOENÇAS E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM  
PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Tese de Doutorado apresentada como requisito para obtenção do grau de Doutor em Agronomia.  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia.  
Orientador: Prof. Titular Dr. Paulo Roberto Silva Farias

31/08/2020  
Data da Aprovação

**BANCA EXAMINADORA**



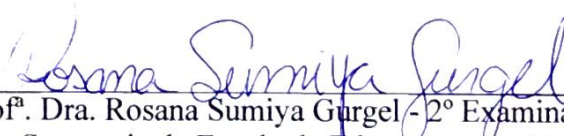
---

Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias - Presidente  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



---

Prof. Dr. Alessandro Ferraz Palmeira - 1º Examinador(a)  
Fundação COPPETEC / Universidade Federal do Rio de  
Janeiro – UFRJ



---

Profª. Dra. Rosana Sumiya Gurgel - 2º Examinador(a)  
Secretaria de Estado de Educação - SEDUC



---

Prof. Dr. Javier Dias Pita - 3º Examinador(a)  
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA



---

Profª. Dra. Merilene do Socorro Silva Costa - 4º Examinador(a)  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus filhos, Julia Cristina Soares  
e João Almiro Corrêa Soares Junior, por serem  
minha maior fonte de amor e inspiração.

*COM AMOR DEDICO.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela misericórdia e graça de uma vida plena e feliz.

A toda minha família pelo apoio incondicionalmente, em especial aos meus pais Marina Soares e João Conceição Soares pelo amor e preparo para vida.

A minha esposa Daniele Soares, pelo amor dedicado, suporte e amparo familiar, parceria na vida.

Ao meu orientador Professor Titular Paulo Roberto Silva Farias, pela orientação, contribuições e amizade.

A Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, pela oportunidade do trabalho, e desenvolvimento profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - PGAGRO pela excelência em pesquisa e formação profissional, e a todos os professores do programa pela competência sempre dedicada e apoio institucional.

Ao Instituto Ciberespacial - ICIBE, pelo apoio institucional, em especial ao Diretor Pedro Campos, docentes e técnicos administrativos pelo constante incentivo.

Ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, pela oportunidade de desenvolvimento da docência e disseminação dos conhecimentos adquiridos.

A empresa Agropalma S.A pela disponibilização dos dados de pesquisa e acesso as áreas de estudo sempre que solicitada.

Aos membros da Banca Examinadora, Dra. Rosana Sumiya Gurgel, Dra. Merilene do Socorro Silva Costa, Dr. Javier Dias Pita, Dr. Alessandro Ferraz Palmeira e Dr. Laurent Polidor (Qualificação) pela disponibilidade ao exame deste trabalho e pelas valiosas contribuições à ciência.

Aos colegas do PGAGRO, em especial os amigos do Grupo de Pesquisa em Agricultura de Precisão em Fitossanidade: Artur Vinícius, Alex Zissou, Adriano Gama, Drielson Gouvêa, Raphael Coelho, Thiago Silva e Wendy Medeiros, pela troca de conhecimentos e parcerias científicas.

A todos os amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

*MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS.*

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AF – Amarelecimento Fatal

ARVI - Atmospheric Resistant Vegetation Index

AV - Anel Vermelho

CPA - Companhia Palmares da Amazônia

CRAI - Companhia Real Agroindustrial SA)

DN - Digital Numbers

EVI - Enhanced Vegetation Index

GPS - Global Positioning System

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MSI - Multispectral Instrument

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

NIR - Near Infrared Reflectance

OLI - Operational Terra Imager

RED – Reflectância na Banda do Vermelho

RED EDGE – Banda espectral da borda do Vermelho

REM – Radiação Eletromagnética

RENDVI - Red edge Normalized Difference Vegetation Index

RMSE - Root Mean Square Error

SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SR - Sensoriamento Remoto

SWIR - Short-Wave Infrared Band

TI - Tecnologia da Informação

UTM - Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	12
<b>ABSTRACT</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 1: FUNDAMENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	14
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. A AGRICULTURA DE PRECISÃO</b> .....	15
2.1 Mapa de produtividade.....	17
2.2 Agricultura 4.0.....	18
<b>3. A PALMA DE ÓLEO</b> .....	19
3.1 Regiões Produtivas no Brasil.....	19
3.2 Histórico da Palma de Óleo no Pará.....	20
3.3 Aspectos Produtivos e Econômicos.....	21
3.4 Aspectos Fisiológicos.....	22
3.5 Principais Entraves e Ameaças.....	22
<b>4. O SENSORIAMENTO REMOTO</b> .....	23
4.1 Fundamentos do Sensoriamento Remoto para aplicação na agricultura.....	23
4.2 Sensoriamento Remoto e Índices de Vegetação.....	26
4.2.1 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....	26
4.2.2 Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI).....	27
4.2.3 Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI).....	27
4.2.4 Índice de Vegetação Realçada (EVI).....	28
4.2.5 O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada de Borda Vermelha (RENDVI).....	29
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	30
<b>CAPÍTULO 2: DETECTION OF DISEASES IN OIL PALM PLANTATIONS IN THE BRAZILIAN AMAZON THROUGH ORBITAL IMAGE</b> .....	34
<b>ABSTRACT</b> .....	34
<b>RESUMO</b> .....	35
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	36
<b>2. METHODOLOGY</b> .....	38
2.1 Study Area.....	38



2.2 Experimental Database.....	39
2.2.1 Sentinel-2A MSI (Multi Spectral Instrument) .....	39
2.2.2 Phytosanitary and Farming Data.....	39
2.3 Image Pre-processing.....	39
2.4 Vegetation index generation.....	39
<b>3. RESULTS AND DISCUSSION.....</b>	<b>41</b>
3.1 Spectral Characterization Through Reflectance Enhancement.....	41
3.2 Detection of Diseases in the Oil Palm Through Vegetation Indexes.....	42
<b>4. CONCLUSION.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERENCE.....</b>	<b>49</b>
Copyrights.....	51
<b>CAPÍTULO 3: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA ATRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS.....</b>	<b>52</b>
ARTIGO 1: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTIOS JOVENS DE PALMA DE ÓLEO CONVENCIONAL POR SENSOR ORBITAL NO MUNICÍPIO DE TAILÂNDIA- PA.....	52
<b>RESUMO.....</b>	<b>52</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>53</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>2. METODOLOGIA.....</b>	<b>55</b>
2.1 Área de Estudo.....	55
2.2 Base de dados.....	57
2.3 Geração dos Índices de Vegetação.....	57
2.4 Correlação índices de vegetação e produtividade.....	58
2.4.1 Regressão linear.....	58
2.4.2 Coeficiente de Pearson.....	60
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>67</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 1: FUNDAMENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Figura 1: Produção Global de Petróleo e Gordura Comestível no ano de 2015.....	19
Figura 2: Área cultivada nos estados do Pará, Bahia e Roraima.....	19
Figura 3: Níveis de coleta de dados do sensoriamento remoto na agricultura.....	24

### CAPÍTULO 2: DETECTION OF DISEASES IN OIL PALM PLANTATIONS IN THE BRAZILIAN AMAZON THROUGH ORBITAL IMAGE

Figure 1. Geographic localization of the study area.....	38
Figure 2. Spectral characterization by reflectance enhancement of oil palm in L30, L36, H25 and H2 plots.....	41
Figure 3. Fluctuation of the incidence of plants infected with Lethal Yellowing (LY) from 2013 to 2017, in oil palm plots L30, L36, H25 and H27, Acará, Brazil.....	43
Figure 4. NDVI, SAVI and EVI in oil palm plots L30, L36, H25 and H27.....	44
Figure 5. NDVI intensity spatial distribution in oil palm plots L30, L36, H25 and H27 in conventional oil palm crops, Acará (PA), Brazil.....	45
Figure 6. SAVI spatial distribution intensity in oil palm plots L30, L36, H25 and H27 in conventional palm oil crops, Acará (PA), Brazil.....	46
Figure 7. Spatial distribution of EVI intensity in oil palm L30, L36, H25 and H27 plots in conventional oil crops, Acará (PA), Brazil.....	47

### CAPÍTULO 3: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA ATRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS

#### ARTIGO 1: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTIOS JOVENS DE PALMA DE ÓLEO CONVENCIONAL POR SENSOR ORBITAL NO MUNICÍPIO DE TAILÂNDIA-PA

Figura 1: Localização da área de estudo, Fazenda CRAI (Agropalma S.A) .....	56
Figura 2: Índices de vegetação NDVI (a), EVI (b), ARVI (c) e RENDVI (d) dos oito talhões de palma de óleo da área de estudo, no ano de 2014.....	61
Figura 3: Gráficos de correlação por regressão linear da produtividade em campo (ton/ha) e os valores dos médios dos índices de vegetação NDVI (a), EVI (b), ARVI (c) e RENDVI (d) dos oito talhões de palma de óleo no ano de 2014.....	62

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1: FUNDAMENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Tabela 1: Comparação das principais aplicações e características dos índices de vegetação.....30

### CAPÍTULO 2: DETECTION OF DISEASES IN OIL PALM PLANTATIONS IN THE BRAZILIAN AMAZON THROUGH ORBITAL IMAGE

Table 1. Average reflectance values of oil palm in L30, L36, H25 and H27 plots.....34

### CAPÍTULO 3: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA ATRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS

#### ARTIGO 1: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTIOS JOVENS DE PALMA DE ÓLEO CONVENCIONAL POR SENSOR ORBITAL NO MUNICÍPIO DE TAILÂNDIA-PA

Tabela 1: Características dos talhões da área de estudo.....55

Tabela 2: Regressão - Produtividade da Palma de Óleo (Y) nos índices de vegetação – Media dos Talhões. Os índices NDVI, EVI, ARVI e RENDVI apresentam correlação significativa com a Produtividade.....62

Tabela 3: Correlação (r) entre produtividade observada em campo e produtividade estimada através dos diferentes índices de vegetação, no ano de 2014.....63

## RESUMO

O potencial do sensoriamento remoto no manejo agrícola na Amazônia brasileira ainda é pouco explorado apesar de ser altamente promissor com a evolução dos sensores e a chegada das plataformas drones. Sobretudo na detecção e modelagem espacial de doenças, que nas últimas décadas tem impactado fortemente na produtividade das culturas regionais. Antecipar impactos e tendências negativas na produção de palma de óleo, apoiado na detecção remota e metodologias aplicáveis, estão entre os objetivos do presente estudo em nível de doutorado. Nos últimos anos, diversos fatores como pragas, doenças e estiagens intensas interferiram na produtividade da palma de óleo na região, gerando a necessidade de adoção de novas técnicas para detecção e monitoramento desses problemas. No primeiro artigo deste trabalho, foram realizados bem-sucedidos ensaios de análise espectral para detecção de doenças na palma de óleo na Fazenda Companhia Palmares da Amazônia (CPA), pertencente ao grupo Agropalma S.A, no município de Acará-PA. Os experimentos foram realizados nos talhões L30, L36, H25 e H27, com áreas individuais de 36 hectares de plantios do tipo convencional maduro com cerca 16 anos de idade, dispostos em triângulo equilátero com espaçamento de 9 x 9 metros. Foram utilizadas cinco bandas de imagem do sistema Sentinel-2A, sensor MSI, referentes aos espectros visível e infravermelho adquiridas no dia 25 de julho de 2017. Foram geradas as imagens de reflectância, curvas espectrais e índices de vegetação para as áreas dos talhões de palmas de óleo. Os resultados permitiram a identificação de padrões expressivos reflectâncias mínimas e máximas dos talhões estudados, correlacionando-os com as ocorrências de doenças registradas na área. Os resultados demonstraram que o índice EVI que apresentou ótima correlação com ocorrências reais de doenças. Entretanto, os índices NDVI e SAVI também mostraram bons ajustes com a ocorrência de doenças no ano de 2017. As áreas correspondentes aos talhões L36 e H27 apresentaram maior ocorrências de doenças, com bases nas análises por índices de vegetação. Assim, pôde-se concluir que os realces nas imagens por reflectância, NDVI, SAVI e EVI, mostram-se eficientes na detecção de doenças nos talhões. Os resultados permitiram a identificação de anomalias diagnósticas de estresses nos talhões, seja por uma doença ou outro fator, o que possibilita tomada de decisão em tempo hábil, evitando a erradicação em larga escala nas extensas áreas em plantios comerciais de palma de óleo na região. O segundo artigo deste trabalho referiu-se ao cálculo da produtividade de palma de óleo por meio de imagens orbitais, avaliando sua correlação com a produtividade real e com a infestação pelo Amarelecimento Fatal (AF). A estimativa da produtividade por sensoriamento remoto, pode ser utilizada como importante suporte para previsão de safras, apoiando os tradicionais métodos adotados na ocasião das colheitas em campo, que por sua vez podem ser imprecisos, demorados e com alto custo de execução. Neste contexto, o realce espectral através de cálculo de índices de vegetação possui grande potencial para estimar a produtividade do óleo de palma na Amazônia. Para o cálculo da produtividade foram utilizadas as bandas da imagem do sensor Rapideye do ano de 2014 abrangendo uma área experimental com oito talhões convencionais da Fazenda CRAI (Companhia Real Agroindustrial S.A) no município de Tailândia-PA, estado do Pará. A partir das bandas espectrais derivados os índices de vegetação: NDVI, EVI, ARVI e RENDVI. Para a estimativa de produtividade, empregou-se o método estatístico de regressão linear para os dados do ano de 2014, com base na correlação com a produtividade em campo. Preliminarmente o EVI apresentou a melhor correlação com a produtividade observada em campo, demonstrando potencial para estimar a produtividade. A validação do método foi realizada através do erro médio Quadrático - RMSE, o qual considerou satisfatórias as estimativas obtidas, confirmando potencial eficácia do sensoriamento remoto orbital para pesquisas relacionados predição produtiva ou de safras.

**Palavras-chave:** Óleo de Palma, Fitossanidade, Monitoramento agrícola, Amazônia.

## ABSTRACT

The potential of remote sensing in agricultural management in the Brazilian Amazon has been little explored despite being highly promising with the evolution of sensors and the arrival of drone platforms. Especially in the detection and spatial modeling of diseases, which in recent decades has had a strong impact on the productivity of regional cultures. Anticipating impacts and negative trends in oil palm production, supported by remote sensing and applicable methodologies, are among the objectives of this study at the doctoral level. In recent years, several factors such as pests, diseases and severe droughts have interfered in the productivity of oil palm in the region, generating the need to adopt new techniques for detecting and monitoring these problems. In the first article of this work, successful spectral analysis tests were carried out to detect diseases in the oil palm at Fazenda Companhia Palmares da Amazônia (CPA), belonging to the Agropalma S.A group, in the city of Acará-PA. The experiments were carried out in plots L30, L36, H25 and H27, with individual areas of 36 hectares of mature conventional type plantations with about 16 years of age, arranged in an equilateral triangle with 9 x 9 meter spacing. Five image bands of the Sentinel-2A system, MSI sensor, were used, referring to the visible and infrared spectra acquired on July 25, 2017. The reflectance images, spectral curves and vegetation indices were generated for the areas of the palm stands of Oil. The results allowed the identification of expressive minimum and maximum reflectance patterns of the studied plots, correlating them with the occurrences of diseases registered in the area. The results showed that the EVI index showed an excellent correlation with real occurrences of diseases. However, the NDVI and SAVI indices also showed good adjustments with the occurrence of diseases in the year 2017. The areas corresponding to plots L36 and H27 showed higher occurrences of diseases, based on the analysis by vegetation indices. Thus, it could be concluded that the enhancements in the reflectance images, NDVI, SAVI and EVI, are efficient in detecting diseases in the plots. The results allowed the identification of diagnostic anomalies of stresses in the plots, either due to a disease or other factor, which allows decision making in a timely manner, avoiding large-scale eradication in the extensive areas of commercial oil palm plantations in the region. The second article of this work referred to the calculation of palm oil productivity by means of orbital images, evaluating its correlation with actual productivity and with the infestation by Fatal Yellowing (FA). The productivity estimation by remote sensing can be used as an important support for forecasting harvests, supporting the traditional methods adopted when harvesting in the field, which in turn can be imprecise, time consuming and with high cost of execution. In this context, spectral enhancement through the calculation of vegetation indices has great potential to estimate the productivity of palm oil in the Amazon. For the calculation of productivity, the bands of the Rapideye sensor image for the year 2014 were used, covering an experimental area with eight conventional plots of Fazenda CRAI (Companhia Real Agroindustrial SA) in the municipality of Thailand-PA, state of Pará. spectra derived from the vegetation indices: NDVI, EVI, ARVI and RENDVI. For the productivity estimate, the statistical method of linear regression was used for the data for the year 2014, based on the correlation with the productivity in the field. Preliminarily, the EVI presented the best correlation with the productivity observed in the field, showing the potential to estimate productivity. The validation of the method was performed using the mean Quadratic-RMSE error, which considered the estimates obtained satisfactory, confirming the potential effectiveness of orbital remote sensing for research related to productive or crop prediction.

**Keywords:** Oil palm, Plant health, Agricultural monitoring, Amazon.

## **CAPÍTULO 1: FUNDAMENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO**

### **1. INTRODUÇÃO**

A atividade agrícola no mundo passou a ser fortemente beneficiada e em muitos casos dependente do uso de geotecnologias e dados espaciais, essenciais para o monitoramento, modelagens dos processos de planta e solo e gestão dos recursos agrícolas. A evolução das geotecnologias, especificamente o sensoriamento remoto e o geoprocessamento, contribuiu para o desenvolvimento de metodologias aplicadas no mapeamento das áreas agrícolas, sobretudo na estimativa da produtividade agrícola, sustentabilidade ambiental, previsão de safras, acompanhamento dos ciclos de crescimento de culturas, dentre outras atividades de suporte às decisões.

O incentivo ao uso do sensoriamento remoto na agricultura se intensifica pela ampla diversidade e disponibilidade de imagens gratuitas e pagas, com resoluções adequadas para coberturas de extensas áreas agrícolas e recobrimento contínuo. Os princípios do sensoriamento remoto permitem a identificação e o mapeamento de vários parâmetros do solo e da planta. Além disso, possibilita a coleta de uma grande quantidade de dados, superior ao que é permitida pelas tradicionais técnicas adotadas no manejo convencional. Detectores remotos captam os estímulos bio-físico da vegetação de forma indireta, através da refletância e absortância, permitindo caracterizar a variabilidade na biomassa, teor de clorofila e integridade celular das folhas. Atualmente, alia-se ao sensoriamento orbital as plataformas aéreas não tripuladas, com sensores de alta resolução espacial, formando uma grande diversidade de produtos com ótimas qualidades espaciais, espectrais e temporais, capazes de prover soluções para o manejo de precisão na maioria das culturas agrícolas.

Neste contexto, a cultura da palma de óleo pode ser altamente beneficiada a partir da utilização de geotecnologias nas suas rotinas de manejo, sobretudo no monitoramento de pragas e doenças, estimativa de produtividade e acompanhamento de ciclos de crescimento.

O presente trabalho está organizado em capítulos onde se apresenta a contextualização do problema, sua justificativa de abordagem, referencial teórico e os artigos do trabalho já publicados ou submetidos em periódicos indexados. A principal abordagem buscou explorar o potencial de dados orbitais para detecção de doenças e estimativa da produtividade, respectivamente, em plantações de palma de óleo na Amazônia brasileira, tendo especificamente como objetivos: i) viabilizar uma metodologia simples para inferir sobre a presença de anomalias fitossanitária; ii)

antecipar tendências negativas na produção de palma de óleo; iii) avaliar as melhores técnicas de processamento digital de imagens e análises estatísticas para estimativa de produtividade na palma de óleo; iv) modelar correlações de produtividade da palma de óleo com diversos índices de vegetação, de modo a avaliar suas eficiências para o ambiente e cultura local; v) estabelecer as bases de apoio para criação modelos preditivos mais consistente para a palma de óleo na região.

As principais hipóteses investigadas, baseiam-se nos fundamentos do comportamento espectral da vegetação e culturas agrícolas. As bandas de absorção de REM na faixa visível, devido a presença de pigmentos carotenoides e clorofila, fornecem a informação de normalidade ou não do processo de fotossíntese da cultura. De outra forma, a vegetação apresenta forte reflectância no infravermelho próximo, comportamento esperado para vegetação sadia, associado à integridade da estrutura foliar da cultura. A utilização dos índices de vegetação e análises espectrais, permitem a percepção de possíveis anomalias, como a redução dos picos de absorção no visível (anomalia fotossintética) e queda da reflectância no infravermelho (desestruturação celular das folhas), permitindo inferir sobre ocorrências fitossanitárias e variação de produtividade.

## 2. A AGRICULTURA DE PRECISÃO

Atualmente agricultura de precisão (AP) uma terminologia usada nos sistemas agrícolas de todo o mundo. Segundo Whelan e Taylor (2013), primeira definição de agricultura de precisão vem da Câmara dos representantes dos Estados Unidos, que define como um sistema integrado de manejo agrícola baseado em informações de produção projetado para aumentar a eficiência, a produtividade e a lucratividade a longo prazo, específicas para um local ou uma fazenda de produção, ao mesmo tempo que minimiza impactos ao meio ambiente. Uma segunda definição restringe a agricultura de precisão a uma gestão detalhada e específica de um sistema local. Assim, a aplicação de recursos e a práticas agronômicas são dimensionadas para atender às necessidades de solo e cultivo, pois considera a variabilidade de parâmetros em campo.

Segundo Whelan e Taylor (2013), dentre os objetivos da agricultura de precisão estão i) otimizar a eficiência da produção; ii) maximizar a qualidade; iii) minimizar o impacto ambiental; e iv) minimizar riscos. A implementação de uma sistemática para a agricultura de precisão envolve, no mínimo a adoção de outros cinco parâmetros necessários para tomada decisão (WHELAN e TAYLOR, 2013):

- 1) **Georreferenciamento dos dados agrícolas:** a capacidade de obter dados agrícolas georreferenciados ou vinculá-los a um local específico na superfície da Terra, com base em coordenadas. Assim, destacam-se as geotecnologias como: os sistemas de

navegação global por satélite (GNSS) e o sensoriamento remoto (SR). Como suporte aos georreferenciamento e a manipulação dos dados destacam-se inúmeros softwares de geoprocessamento, com destaque para os sistemas de informação geográfica e os programas de tratamento de imagens. Nestas aplicações estão incluídos o monitoramento de safras e solo, mapeamento de produção e sistemas de direção automática de veículos (WHELAN e TAYLOR, 2013).

- 2) **Monitoramento de safra, solo e clima:** através de sensores diversos com medições in loco ou remotas, estáticas e em movimento, é possível monitorar diversas culturas, solo e variáveis climáticas. Estes incluem sensores de produção, biomassa, térmicos, câmeras, redes estações meteorológicas, sensores de condutividade elétrica do solo, sensores de radiometria gama, dentre outros (WHELAN e TAYLOR, 2013; (ZHANG, 2016).
- 3) **Mapeamento de atributos:** Os dados extraídos do cultivo, sejam eles automatizados (p.ex. sensores) ou manuais (planilhas, formulários, relatórios) podem ser especializados/interpolados em superfícies contínuas para permitir a sua análise. Dentre as técnicas muito utilizadas estão as interpolações geoestatísticas, capazes de representar a distribuição espaço-temporal de dados brutos com melhor precisão.
- 4) **Sistemas de suporte à decisão:** são sistemas de apoio à decisão que utilizam dados agronômicos e ambientais, combinados com informações de manejo, para determinar a estratégia de manejo ideal. São baseados na resposta "média" da cultura, permitindo modelar aplicação de insumos em demanda local. O sistema deve ser capaz de lidar com grande quantidade e variedade de dados coletados, bem como a dinâmica do cultivo, solo e ambiente (WHELAN e TAYLOR, 2013).
- 5) **Operação diferencial:** envolve o tratamento variável, sobretudo com a aplicação de insumos usando tecnologia de taxa variável: fertilizantes, corretivos, defensivos, irrigantes, dentre outros. Com apoio de tecnologias para geolocalização e produção de mapeamentos precisos, a técnica torna o agronegócio econômico, especialmente na agricultura em larga escala (WHELAN e TAYLOR, 2013).

Com esse potencial, a agricultura de precisão surge como estratégia para aperfeiçoar o manejo e a agricultura produtiva, apoiando o gerenciamento e o desenvolvimento de lavouras, por meio do mapeamento detalhado de fatores produtivos internos (planta, solo e água) e fatores externos (pragas, doenças, clima), ações de aplicação localizada de insumos (defensivos e fertilizantes), otimização de irrigação e mecanização agrícola.



Frequentemente, em ambientes de produção, os mapas de safras e produtividade são os produtos finais gerados pelos setores de agricultura de precisão. Embora os mapas de produtividade forneçam informações diretas, existem outras informações práticas que podem ser extraídas deles. A geração dessas informações não é simples e envolve a aplicação de modelos complexos baseados em estatísticas e matemática computacional (ZHANG, 2016).

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, as práticas de agricultura de precisão têm demonstrado que é possível alocar precisamente os insumos com base nas necessidades de cada talhão ou célula de cultivo. Para isso é preciso gerar mapas de solos/planta (nutrientes, químicos, teores, dispersão, produtividade, dentre outros) capazes de prover a percepção espaço-temporal necessária para a efetiva correção, a tempo de garantir a produção mínima para a sustentabilidade econômica da cultura (MOLIN et al., 2015). Outro fator intimamente ligado à eficiência produtiva, proporcionada pela implantação das técnicas da agricultura de precisão, refere-se à diminuição do impacto ambiental, minimizando a contaminação das águas e solos, preservando áreas nativas, e reduzindo a erosão dos solos.

A eficiência da agricultura de precisão, se traduz na forma de tratar o ambiente como sendo heterogêneo, mesmo que grande parte dele pareça uniforme. Desta forma, se a variabilidade de fatores como tipo de solo e fertilidade forem precisamente calculadas, estas informações poderão otimizar aplicações e/ou correções pontuais, sendo este o conceito moderno de agricultura de precisão (TSCHIEDEL & FERREIRA 2002). Vale ressaltar que o sucesso das técnicas aplicadas em agricultura de precisão depende do conhecimento agrônomo e da qualidade dos registros e coletas de campo.

Para Dallmeyer & Schlosser (1999), a agricultura de precisão representa uma nova filosofia de prática agrícola altamente influenciada pelo sensoriamento remoto, os sistemas de informações geográficas (SIG) e o sistema de posicionamento global (GPS).

A evolução das geotecnologias e dos sistemas computacionais tem proporcionado à agricultura moderna uma nova forma de enxergar a propriedade rural, deixando de ser uniforme para se tornar variável, permitindo a percepção das características específicas (TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002).

## **2.1 Mapa de produtividade**

Para Molin (2002) e Molin et al. (2015), diversas ferramentas auxiliam na agricultura de precisão, dentre estas estão os mapas de produtividade, que permitem caracterizar a variabilidade

da produção das áreas de cultivo. Tais mapas são compostos por pontos que representam as diversas porções da lavoura, normalmente definidos no processo de colheita manual ou automatizado pelas plataformas colhedoras. Tais dados são convertidos em raster georreferenciados, em sistemas de informação geográfica, através de métodos de interpolação.

Os mapas permitem a definição de zoneamentos de produtividade e classes de manejo, sendo possível sua integração com dados isolados de análises de solo, topografia, ocorrência de pragas e doenças e sensores remotos. Também são empregados métodos associados a ferramentas de estatística, permitindo a utilização de dados que mais representam a variabilidade espacial das lavouras.

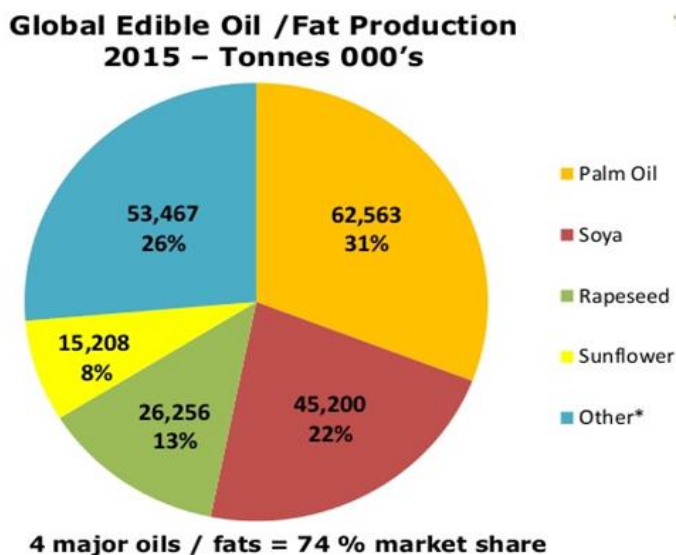
## **2.2 Agricultura 4.0**

O aprimoramento da tecnologia da informação (TI) com foco agropecuário, vem causando uma revolução na tomada de decisão no campo, com auxílio informações precisas e em tempo real, tornam mais eficientes e modelos os processos de produção. Com apoio das geotecnologias (sensores terrestres de ambientes, sensores remotos, drones, sistemas de rastreamento por GPS), máquinas e tratores modernos, a TI tem buscado para automatizar e modelar extensos bancos de dados, com apoio de softwares ou aplicativos, permitindo a derivação de produtos e modelos capazes de otimizar e antecipar projeções do processo produtivo. Máquinas e tratores também integram a agricultura 4.0, possibilitando a automatização de processos através de simples e complexos aplicativos, que permitem sua operação remota, concomitantemente com a coleta de dados do manejo e da lavoura (RIBEIRO et al., 2018). O uso destacado de ferramentas de TI tem sido crescente entre os grandes produtores (commodities como soja, milho, algodão, cana-de-açúcar, frutas cítricas e café). Neste contexto, a agricultura 4.0 tem possibilitado a conexão em tempo real das TI e o uso da inteligência artificial para comando e controle da produção agrícola nas suas diversas etapas.

Neste cenário, moderno e até futurista, as operações agrícolas deverão funcionar com tecnologias sofisticadas, inclusive com uso de robôs, sensores ambientais diversos, geotecnologias e robustos sistemas e processamento e armazenamento de dados in loco e em nuvens, com suporte estável de conexão de internet. Esses dispositivos avançados, agricultura de precisão e sistemas robóticos permitirão que as fazendas de produção sejam mais lucrativas, eficientes, seguras e ecologicamente corretas (DE CLERCQ et al., 2018).

### 3. A PALMA DE ÓLEO

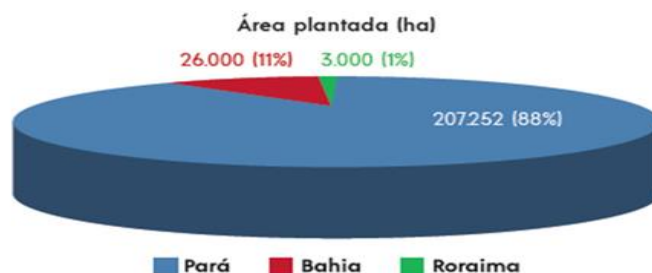
A palmeira *Elaeis guineenses Jacq.*, também conhecida como palma de óleo, é uma oleaginosa de origem africana, responsável por mais de 30% da geração de óleo vegetal no planeta, superando a soja em produção no ano de 2015 (Figura 1) (GREENPALM SUSTAINABILITY, 2016), com menor área plantada (LEVERMANN & SOUZA, 2014).



**Figura 1:** Produção Global de Petróleo e Gordura Comestível no ano de 2015.  
Fonte: GreenPalm Sustainability (2016).

#### 3.1 Regiões Produtivas no Brasil

No Brasil, a palma de óleo é cultivada em larga escala na Amazônia brasileira, em áreas já desmatadas do Estado do Pará, totalizando aproximadamente 207 mil hectares de área plantada, cerca de 88% do cultivo nacional. Outros estados produtores são Bahia (11%) e Roraima (1%) (Figura 2). No ano de 2015, as principais empresas brasileiras de óleo de palma no Brasil movimentaram cerca de 1,2 bilhões de reais, empregando mais de 20 mil trabalhadores (ABRAPALMA, 2018).



**Figura 2:** Área cultivada nos estados do Pará, Bahia e Roraima.  
Fonte: MAPA (2018); ABRAPALMA (2018).

Na produção de palma de óleo, destacam-se os municípios paraenses de Acará, Baião, Bujaru, Concórdia do Pará, Igarapé- Açu, Moju, São Domingos do Capim, Tailândia e Tomé-Açu. Esta região é favorecida por condições agroclimáticas ideais e incentivo governamental do Programa de Produção Sustentável da Palma de óleo no Brasil (ALVES et al., 2016). Assim, o estado do Pará passou a ser um importante protagonista no cultivo da palma de óleo e obteve maior visibilidade e incentivos na mesorregião Nordeste do Estado, com a instalação de diversos Projetos de expansão da cultura.

### 3.2 Histórico da Palma de Óleo no Pará

Segundo Müller et al. (2006), o dendezeiro foi introduzido no Brasil no século XVI, supostamente por escravos vindos da África Ocidental, e foi disseminado no nordeste brasileiro a partir dos Estados de Pernambuco e Bahia. Inicialmente, o azeite era muito utilizado na culinária e rituais religiosos dos cativos africanos. Na região Nordeste encontrou clima e solo propícios para sua adaptação e desenvolvimento, principalmente na chamada de Costa do Dendê, entre os municípios de Ilhéus e Salvador, no Estado da Bahia.

No Estado do Pará foi inserido a partir de 1942, com sementes provenientes da Bahia, através da então Secção de Fomento Agrícola do Estado do Pará, atual Ministério da Agricultura. A partir da década de 1950, foram plantadas mudas pelo antigo Instituto Agrônomo do Norte (IAN), atual Embrapa Amazônia Oriental, que também passou a receber sementes advindas de outras fontes, com estudos de adaptabilidade às condições edafoclimáticas regionais. A partir de 1966 foram implantados os primeiros plantios comerciais no Pará, localizados na Rodovia PA-391 (Belém-Mosqueiro), atual município de Santa Bárbara, através da Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) e posteriormente através da companhia Dendê do Pará S.A. (DENPASA) (MÜLLER et al., 2006).

A partir da década de 1980, houve a implantação de projetos de Palma de Óleo com fomentos do poder público nos municípios de São Domingos do Capim, Moju, Acará, Tailândia, Igarapé-Açu, Santa Izabel do Pará, Bonito, Tomé-Açu, Concórdia do Pará. Boa parte dos projetos de cultivos implantados, foi acompanhado de usinas de beneficiamento de cachos e extração de óleo (MÜLLER et al., 2006).

Ainda em 1974, foram detectados os primeiros casos de Amarelecimento Fatal (AF) em plantios da DENPASA, no município de Santa Bárbara-PA. A doença já afetou plantios e outros países e ameaça a expansão da cultura na Amazônia. Em 1984, houve um forte incremento no número de casos de AF no Pará, motivando os plantadores a solicitar a intervenção da Embrapa e

outras instituições na realização de pesquisas para identificação do agente causal e propor soluções (MÜLLER et al., 2006).

A partir da década de 2000, várias outras companhias se instalaram na região, absorvendo projetos pioneiros e ampliando as áreas plantadas. Neste processo, houve a implementação de um novo modelo que apoia o desenvolvimento da cultura nas pequenas propriedades e assentamentos, envolvendo financiamento e assistência técnica aos pequenos produtores locais, que tem sua produção cachos absorvida pelas empresas associadas. Atualmente, o Pará é responsável pela maior produção nacional de óleo de palma, totalizando aproximadamente 207 mil hectares de área cultivada (ABRAPALMA, 2018).

### 3.3 Aspectos Produtivos e Econômicos

Fatores como a produção e a taxa de extração de óleo de palma são fundamentais para determinar a viabilidade de investimentos nos cultivos, influenciando diretamente na rentabilidade das empresas que investem nesta cultura no país (TELES, 2014). A partir da palma de óleo é produzido o óleo de palma, extraído do mesocarpo, e o óleo de palmiste, proveniente da amêndoa. A crescente demanda mundial destes óleos está relacionada ao mercado consumidor que os utiliza nas indústrias de alimentos, cosméticos, higiene e limpeza, agro-energia e biocombustíveis. Neste contexto de aumento de demanda, cerca de 80% da produção é direcionada para a indústria de alimentos, como margarinas, cremes, sorvetes, biscoitos, chocolates, enchimentos e substitutos de manteiga de cacau e óleo de cozinha (ABRAPALMA, 2018). Por todas essas razões, a palma de óleo tem despertado o interesse crescente do mercado, da indústria, de cientistas, especialistas e setor privado, com perspectivas futuras para a produção de biocombustíveis na região Amazônica.

As projeções mundiais para o consumo de óleo de palma, apontam para grandes transformações e aumentos na demanda/consumo mundial nos próximos 10 anos: i) crescimento superior a 25 milhões de toneladas na demanda de óleo de palma por ano; ii) produção mundial chegando a 85 milhões de toneladas para satisfazer a grande demanda; iii) países líderes na produção como Malásia e Indonésia não conseguirão suprir a demanda necessária, devido a diminuição dos seus plantios e dificuldades de recuperar/replantar áreas antigas e improdutivas; v) surgimento de novas tecnologias para aumentar a taxa de extração de óleo e introdução da mecanização na cultura (OIL WORLD, 2017).

Entretanto, no ano de 2020, frente ao contexto da pandemia de Covid-19, já se observa uma tendência de declínio na produção da Malásia, para os meses de julho a dezembro de 2020. Este início de desaceleração da produção da Ásia, sobretudo da Malásia, contrastando com crescente

expansão no mundo, reduziram fortemente os estoques de óleo de palma em torno de a 1,7 Mn T, somente no final de julho e início de agosto de 2020. Adicionalmente, ainda existe uma severa escassez de mão de obra nas plantações da Malásia, devendo-se manter a produção de óleo de palma abaixo do potencial no período de agosto a outubro de 2020 (período de pico de produção nos últimos 10 anos), potencializando o declínio entre julho e dezembro de 2020 (OIL WORLD, 2020).

Dentre as várias oleaginosas existentes, além da palma de óleo possibilitar alta produtividade de energia por área, é uma cultura perene e, ainda abrange a cadeia produtiva da agricultura familiar (RAMALHO FILHO et al., 2010).

### 3.4 Aspectos Fisiológicos

A palma de óleo é uma espécie perene, com elevado metabolismo fotossintético. Inicia o seu período produtivo entre o segundo e terceiro ano do plantio, atingindo sua máxima produtividade após o décimo ano, e se mantendo produtiva até os 25 ou 30 anos (ABRAPALMA, 2018). A dinâmica hídrica da palma de óleo está entre os fatores mais importantes para a produtividade da cultura, com a palma de óleo adaptando-se em regiões com ocorrência considerável de precipitação ao longo de vários meses do ano (VIANA et. al. 2019).

### 3.5 Principais Entraves e Ameaças

Apesar dos bons tratos culturais adotados no Brasil, bem como adaptações genéticas visando diminuir a incidência de doenças e pragas, a realidade dos cultivos amazônicos ainda impõe sérias dificuldades em relação ao manejo fitossanitário na região. Uma das dificuldades é a identificação das plantas e talhões/setores infectados em cultivos tão extensos, o que torna as medidas de contenção e correção mais onerosas e demoradas.

Doenças como o Anel Vermelho (AV) e o Amarelecimento Fatal (AF) são problemas críticos para a cultura da palma de óleo na Amazônia brasileira, impactando diretamente na sustentabilidade econômica dos cultivos. No Estado do Pará, milhares de hectares de plantios já foram erradicados por conta destes problemas, se caracterizando como um dos mais sérios entraves para expansão da cultura no Estado.

O AV é considerado uma doença letal à palma de óleo é causada pelo nematoide *Bursaphelenicus cocophilus*. No campo, é disseminado por um inseto-praga e vetor, o *Rhynchophorus palmarum*. Como manejo do Anel Vermelho, tem sido utilizada a eliminação total de plantas que apresentam sintomas, para diminuir o foco de disseminação nos plantios

remanescentes. Entretanto, a principal estratégia tem sido o controle do inseto vetor, com armadilhas nos plantios e o uso de predadores naturais (RAMALHO FILHO et al., 2010).

As causas do AF ainda não foram determinadas, dificultando seu controle, apesar dos investimentos em estudos para se estabelecer a razão de sua ocorrência. Algumas hipóteses científicas, foram suscitadas: i) o AF possui um foco inicial e se dispersa de acordo com as condicionantes biótica da região; ii) os fatores climáticos (precipitação e insolação) influenciam no desenvolvimento da doença; iii) a ocorrência estaria associadas a condições e topográficas que favoreceriam a inundação das raízes; iv) proximidade de lençóis freáticos rasos, dentre outras (AMARAL, 2016).

Mesmo com as ações convencionas de monitoramento de doenças e da produtividade, ainda é grande a necessidade da utilização de técnicas e tecnologias que permitam melhorar a gestão sustentável e ampliação de áreas plantadas, o aumento da produtividade e a redução dos custos de produção.

Diante do aumento das áreas cultivadas e da reconhecida importância econômica da cultura na Amazônia brasileira, principalmente no Estado do Pará, surge a necessidade de informações confiáveis, abrangentes, sistemáticas e ágeis sobre a palma de óleo.

Isto se torna ainda mais crucial quando estes problemas fitossanitários afetam fortemente a cultura e diminuem sua expansão (DUARTE et al., 2008; PINHO et al., 2016), bem como pela ausência de técnicas para estimativa e monitoramento da dinâmica de produtividade da cultura.

## **4. O SENSORIAMENTO REMOTO**

### **4.1 Fundamentos do Sensoriamento Remoto para aplicação na agricultura**

Para Lillesand, et al. (2015), o sensoriamento remoto (SR) representa a ciência e a arte de obter informações sobre objetos, áreas ou fenômenos por meio da análise de dados adquiridos por sensores remotamente posicionados para medir determinados alvos sob investigação. Em muitos aspectos, o SR pode ser considerado um processo de leitura, usando vários sensores, de dados que podem ser analisados para derivação de informações de interesse estratégico. Atualmente, também se entende o SR como uma geotecnologia moderna, composta por sensores e plataformas capazes de obter informações da superfície sem haver contato físico, e muitas vezes à longas distâncias.

Dentre os primeiros conteúdos publicados em língua portuguesa, destaque para Novo (1989), que define o sensoriamento remoto como sendo a utilização de sensores e equipamentos para processamento remoto de dados, com a finalidade de estudar o meio físico terrestre através

do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética (REM) e os diversos objetos que compõem a superfície terrestre.

Após o processo de interação da REM com as propriedades bio-físico-químicas dos objetos, ocorre o fracionamento da mesma (absorção, reflexão e transmissão) e, dependendo do objeto e da faixa espectral pode haver maior ou menor taxa de REM refletida ou absorvida (MOREIRA, 2011). A REM que retorna ao sensor constitui o parâmetro necessário para a interpretação dos dados referentes aos alvos da superfície terrestre. Desta forma, são utilizadas REMs em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, compondo as bandas ou regiões espectrais. Os sensores ópticos tem a radiação solar como principal fonte de REM e se utilizam predominantemente das regiões do visível (representadas principalmente pelas faixas azul, verde e vermelho) e do infravermelho (subdivida pelos espectros próximo, médio e distante).

A REM refletida possibilita ao sensor identificar a característica de cada objeto, permitindo sua identificação e avaliação das condições comportamentais próprias, assim objetos diferentes irão interagir distintamente com a REM em diversos comprimentos de onda, o que permitirá sua melhor análise.

As imagens ou dados de sensores remotos podem ser obtidas a partir de diversas plataformas, em diferentes níveis de coleta das informações, através de satélites, aeronaves tripuladas, veículos aéreos não tripulados, máquinas agrícolas, dentre outras (Figura 3) (PEREIRA, 2019).



**Figura 3:** Níveis de coleta de dados do sensoriamento remoto na agricultura.

Fonte: Pereira (2019).

No meio rural o SR já vem sendo utilizado em diversas aplicações e buscado fornecer informações importantes ao agronegócio e ao poder público regulador, tais como mapeamento do



uso do solo e da cobertura vegetal, estimativa de áreas agrícolas, correlação de índices de vegetação com a disponibilidade hídrica e ocorrência de doenças, monitorar o desenvolvimento vegetativo das culturas, dentre outras aplicações (RUDORFF & MOREIRA 2002; BORATTO & GOMIDE 2013; LINHARES et al., 2014).

No contexto da agricultura de precisão, várias aplicações podem ser adotadas através do uso do SR, dentre elas, se destacam: i) estimativa de produtividade e biomassa da cultura; ii) detecção e monitoramento de pragas e doenças, e estresse hídrico nas plantas; iii) avaliação de estágio fenológico (BRANDÃO, 2009).

Uma das aplicações de interesse agrícola é a detecção de diferenças na refletância espectral, relacionadas a anomalias em plantios e cobertura vegetal. O estudo do comportamento espectral é uma das mais importantes áreas do SR, podendo ser efetivado por meio de análises de curvas espectrais em diferentes faixas de REM nos espectros do visível e do infravermelho, bem como por mapas de realce espectral por índices de vegetação a partir de imagens. Os dados de refletância espectral estão associados às características fisiológicas das plantas (índice da área foliar, biomassa, fração radiativa interceptada fotossinteticamente, dentre outras) (ATZBERGER, 2013), o que permite inferir, por exemplo, sobre a ocorrências de doenças.

A fotossíntese é um processo de armazenamento REM nas folhas e em outras partes verdes das plantas. Inicia quando a radiação atinge os cloroplastos, pequenos corpos existentes nas folhas, os quais contêm uma substância verde chamada clorofila. A estrutura das plantas é adaptada para possibilitar as interações com a REM, com formatos de folhas e dosséis vegetais, que por sua vez são registrados pelos sensores remotos (JENSEN, 2009).

Considerando o fato de que, na agricultura, a análise de assinaturas espectrais e índices de vegetação, geoprocessadas para as áreas de cultivo, auxiliam na inferência de anomalias, é recomendado a identificação do padrão espectral da cultura (saudável e doente) e possíveis variedades genéticas a ainda momentos sazonais, para se criar um conjunto de curvas que caracterizem o comportamento espectral variado da cultura (SOARES et. al., 2020).

O avanço tecnológico dos últimos anos, potencializou o lançamento de grande variedade de sensores e plataformas, tanto de operação orbital quanto aéreas, melhorando as resoluções das imagens, e permitindo o mapeamento detalhado (espacial e espectral) e rápidos ciclos de monitoramento (temporal). Entre os sistemas de sensoriamento remoto mais utilizados na agricultura, os sensores multiespectrais que utilizam faixas de energias do espectro óptico (visível e infravermelho) possuem destaque, com grande volume de imagens disponíveis em diversos

repositórios gratuitos, sobretudo imagens orbitais de média e baixa resolução espacial. Vale ressaltar que a maioria dos usuários na agricultura tem optado por imagens oferecidas por sistemas de maior revisita que possam disponibilizar imagens em curtos intervalos de tempo, mesmo que restritas ao espectro da luz visível (ATZBERGER, 2013; ZHANG et al., 2019; SOARES et.al., 2020). Entretanto já se observa um constante aumento de uso da faixa espectral infravermelha, onde a expressão da cobertura vegetal é mais efetiva.

## 4.2 Sensoriamento Remoto e Índices de Vegetação

Interpretar corretamente imagens de SR e obter análises confiáveis pode ser um desafio para os analistas do setor agrícola, isto porque a refletância espectral é afetada por diversos fatores ambientais, do meio físico agrícola ou de geometria de aquisição do SR, tais como: densidade e espaçamento da cultura vegetal, anomalias nos pigmentos (por exemplo, clorofila, carotenóides), estrutura do dossel, propriedades do solo (por exemplo, água, ferro oxidado, teor de carbono), intensidade e ângulo solar e fatores atmosféricos (PONZONI et al., 2012). Neste contexto, os índices vegetativos passaram a compor produtos de análises, derivados do SR, importantes para quantificar e qualificar a biomassa da planta ou dossel, bem como contabilizar influencia solo e da água nos sistemas agrícolas. Baseados no comportamento da refletância da vegetação, os índices de vegetação envolvem combinações aritméticas de diferentes bandas espectrais, fundamentais para o realce das propriedades invisíveis das plantas (ATZBERGER, 2013).

Diferentes índices de vegetação podem ser utilizados, com grande eficiência na agricultura, permitindo avaliar um processo ou fenômeno específico de interesse, como a atividade de fotossíntese, estimacão da clorofila, biomassa, índice de área foliar e conteúdo de água (BRANDÃO, 2009). Neste contexto, discorreremos a seguir sobre os índices a serem utilizados no contexto deste trabalho.

### 4.2.1 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) (ROUSE et al. 1973) é o índice de vegetação mais comumente usados. O NDVI é muito utilizado para o monitoramento agrícola, pois apresenta forte correlacão linear com o crescimento das culturas, o desenvolvimento das plantas e seus estágios de crescimento (BERNARDI, et al., 2014). É expresso da seguinte forma (1):

$$NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}} \quad (1)$$

Onde  $P_{nir}$  e  $P_{red}$  representam o valor da imagem de refletância espectral nas regiões do infravermelho próximo (725-1500 nm) e vermelho (~ 600-725 nm), respectivamente. A refletância no vermelho ( $P_{red}$ ) é usada porque a clorofila é fortemente absorvida nesta região do espectro. A clorofila e os carotenóides absorvem a luz azul, tornando esta região do espectro pouco ideal para estimar a vegetação. Vale ressaltar que as refletâncias do vermelho e do infravermelho próximo podem ser afetadas pelas propriedades do solo (umidade, matéria orgânica e composição química); consequentemente, a refletância do infravermelho próximo passa a ser utilizada para corrigir os impactos da variabilidade do solo no cálculo do NDVI (MUELLER & SASSENATH, 2015).

Mapas de NDVI são muito utilizados na análise de culturas agrícolas em diversos países. No Brasil é largamente relacionado à biomassa de florestas e culturas como milho, soja e cana-de-açúcar. Diversos experimentos já demonstraram sua eficiência no manejo de safras (monitoramento de pragas, doenças, indicativos de erosão do solo e produtividade de cultura) (SOARES et al., 2020; LEDA 2016; BERTOLIN 2016).

O fato do NDVI se correlacionar com o índice de área folhear da cultura, até o limite da saturação do NDVI quando o IAF é muito alto (WANG et al., 2005; JENSEN, 2009).

#### 4.2.2 Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

Sobre o uso do NDVI ser problemático em alguns casos, é possível atribuir seu grau de ineficiência à variação da cobertura da superfície, em razão de variações sazonais ou densidade de vegetal; ocorre que a relação entre a absorção de  $P_{red}$  e  $P_{nir}$  muda à medida que as densidades das plantas aumentam. Para se ajustar a esta distorção, Huete (1988) desenvolveu o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI - *Soil-Adjusted Vegetation Index*), calculado como (2):

$$SAVI = \frac{(1 + L_S)(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L_S + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

onde  $L$  é o fator de correção para vegetação variando de 0 (alta cobertura vegetal) a 1 (baixa cobertura vegetal). O Huete (1988) também sugere  $L = 0,5$  para áreas onde o índice de área foliar do dossel é desconhecido. O SAVI passou a ser bastante utilizado na agricultura, normaliza para densidades médias com pouca influência do solo, realçando as altas repostas da vegetação (BERNARDI, et al., 2014).

#### 4.2.3 Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI)

O Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI), desenvolvido por Kaufman e Tanré (1992) sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), buscando reduzir a

influência das condições atmosféricas sobre o NDVI. São utilizadas as bandas do azul ( $P_{blue}$ ), vermelho ( $P_{red}$ ) e do infravermelho próximo ( $P_{nir}$ ). A reflectância no vermelho é menor que no infravermelho próximo, assim sendo susceptível aos efeitos atmosféricos. Desta forma, utiliza-se a radiância na região do vermelho-azul ( $P_{red} P_{blue}$ ) mais resistente aos efeitos atmosféricos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007), ao invés da radiância no vermelho (como no NDVI) que. O ARVI é calculado pela seguinte Equação (4):

$$ARVI = \frac{(P_{nir} - (2 * P_{red} - P_{blue}))}{(P_{nir} + (2 * P_{red} - P_{blue}))} \quad (4)$$

Onde  $P_{nir}$  é refletância na banda do infravermelho próximo (NIR),  $P_{red}$  é a refletância na banda do vermelho (RED) e  $P_{blue}$  representa a refletância na banda do azul (BLUE).

#### 4.2.4 Índice de Vegetação Realçada (EVI)

O Índice de Vegetação Realçada (*Enhanced Vegetation Index* - EVI) foi desenvolvido também otimizar o sinal da vegetação, com sensibilidade em regiões com alta biomassa. Foi um índice melhorado para minimizar a influência da atmosfera e da dissociação do sinal de fundo do dossel (HUETE et al., 2002). O cálculo desse índice baseado na equação (3):

$$EVI = G \frac{P_{nir} - V}{P + C_1 P_{red} + C_2 P_{blue} + L} (1 + L) \quad (3)$$

Onde:  $G$  = fator de ganho ajustado;  $P_{nir}$  = refletância na banda do infravermelho próximo (NIR);  $P_{red}$  = refletância na banda do vermelho (RED);  $P_{blue}$  = refletância na banda espectral do azul (BLUE);  $L$  = fator de ajuste para solo;  $C_1$  e  $C_2$  = coeficientes de ajuste da influência dos aerossóis.  $C_1$  = Coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6);  $C_2$  = Coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5). Esses valores podem variar dependendo das condições atmosféricas e do sensor.

Pode-se considerar que o EVI é um índice parecido com o NDVI, porém modificado. Possui um fator de ajuste para solos ( $L$ ), e dois coeficientes ( $C_1$  e  $C_2$ ) que relacionam o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico. O fator  $G$  representa o ganho ajustado. O EVI melhora a sensibilidade nas regiões de alta biomassa, com melhor desempenho para monitoramento da vegetação, reduzindo a influência do sinal do substrato abaixo do dossel, bem como através da redução da influência atmosférica (HUETE et al., 1997; HUETE et al., 2002.).

#### 4.2.5 O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada de Borda Vermelha (RENDVI)

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada de Borda Vermelha (*Red edge Normalized Difference Vegetation Index* - RENDVI), proposto por Gitelson e Merzlyak (1994), foi adaptado do NDVI. Sua aplicação tem sido consolidada na agricultura de precisão e monitoramento florestal. Utiliza a banda Red edge ao invés da banda Red, que é típica de absorção. O RENDVI otimiza a banda Red edge da vegetação, realçando no índice as suaves variações da biomassa do dossel. O valor desse índice varia de -1 a 1 e o intervalo típico para a vegetação verde é de 0,2 a 0,9 (GITELSON e MERZLYAK, 1994). É calculado por (5):

$$\text{RENDVI} = \frac{(P_{nir} - P_{red\ edge})}{(P_{nir} + P_{red\ edge})} \quad (5)$$

Onde  $P_{nir}$  representa a refletância na banda do infravermelho próximo (NIR).  $P_{red\ edge}$  é a refletância na banda da Red edge.

A Tabela 1 apresenta os índices de vegetação apresentados neste estudo, abordando a comparação das principais aplicações, características, parâmetros biofísicos, vantagens e desvantagens.

**Tabela 1:** Comparação das principais aplicações e características dos índices de vegetação.

Índice	Parâmetro Biofísico	Aplicações	Limitações	Vantagens
<b>NDVI</b> (Rouse et al. 1973)	>Absorção (RED) (clorofila/carotenoide) > Reflexão (NIR) (Estrut. Celular)	-Biomassa agrícola/florestal (quant/qual) -Atividade de clorofila -Integridade fisiológica -Desenvolvimento vegetativo	-Condições atmosféricas -Interferência do solo -Saturação em áreas com alta de biomassa -Mudanças sazonais abruptas -Apenas biomassa superficial -Dificuldade em detectar varrições na vegetação	-Sensibilidade (pragas e doenças, estiagens, ervas-daninhas, herbicidas, fertilizantes -Simplicidade em relação a outros índices.
<b>EVI</b> (Huete et al. 1997)	-Incorpora fator de correção do solo	-Variações na resposta estrutural do dossel (área foliar, arquitetura do dossel -Fisionomia da planta/dossel	-Menos susceptível a clorofila -vegetação densa	-Áreas com densidades de biomassa -Atenua atmosférica e solo -Discrimina fitofisionomia vegetal -Sensível a resposta Sazonal -Menor saturação em alta biomassa
<b>SAVI</b> (Huete,1988)	>Absorção (RED) (clorofila) < Reflexão (NIR) (Estrut. Celular) -Ajusta o efeito do solo no NDVI	-Biomassa arbórea	-Vegetação esparsa -Vegetação em senescência	-Minimizar solo ao incorporar fator de ajuste dependente da densidade de vegetação
<b>ARVI</b> (Kaufman e Tanré, 1992)	-Utiliza coeficientes de resistência de aerossóis	-Regiões com alta biomassa		-Reduz influência atmosféricas e solo
<b>RENDVI</b> (Gitelson et al. 1996)	-Picos de absorção e reflectância (clorofila e água nas folhas)	-Alterações do conteúdo de água		

## REFERÊNCIAS

ABRAPALMA **Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma**. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/en/palm-oil-in-everyday-life>. Acesso em 16 jul. 2018.

ALVES, R. N. B.; MODESTO JÚNIOR, M. S.; MAGALHÃES, J.; BANDEIRA, B. **Análise comparativa dos custos de implantação do cultivo de dendê solteiro e consorciado com mandioca**. Amazônia: Ciência& Desenvolvimento, Belém, v. 12, n. 22, p. 9-20, 2016.

AMARAL, A. P. M. **Distribuição espacial e temporal do amarelecimento fatal em plantio orgânico de palma de óleo (*Elaeis Guineensis* Jacq.) na Amazônia Oriental**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém. 2016.

ATZBERGER, C. **Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs**. *Remote Sensing*, v. 5, n. 2, p. 949-981. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5020949>. 2013.

BERNARDI, A. C. C., NAIME, J. M., RESENDE, A. V., BASSOI, L. H., INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 596 p. 2014.

BERTOLIN, N. de O. **Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite**. Viçosa-MG, 2016.

BRANDÃO, Z. N. **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, 2009.

DALLMEYER, A. U., SCHLOSSER, J. F. **Mecanización para la agricultura de precisión**. In: BLU, R. O.; MOLINA, L. F. *Agricultura de precisión - Introducción al manejo sitio específico*. Chillán-Chile: INIA. Cap.3, p.75-104. 1999.

DE CLERCQ, M., VATS, A., BIEL, A. **Agriculture 4.0: the future of farming technology**. World Government Summit. 2018.

DUARTE, A. G.; LIMA, I. S.; ARAÚJO JR. J. V.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; CRUZ, M. M. **Disposição do nematoide *Bursaphelenchus cocophilus* (Cobb) baujard, em coqueiros portadores da doença anel-vermelho**. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 30, n.3, p. 622-627, 2008.

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. **Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: spectral features and relation to chlorophyll estimation**. *Journal of Plant Physiology*. p.286-292, 1994.

GREENPALM SUSTAINABILITY. **Certified sustainable palm oil. Graphs - Global Edible Oil & Fat Production 2015**. 2016. Disponível: <http://www.greenpalm.org/resources/graphs>. Acesso em: 30 de julho de 2020.

HUETE, A. R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI)**. *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). 1988.

HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEWEEN, W. A. **Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440-451. 1997.

HUETE, A. R., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P. GAO, X. FERREIRA, G. **Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Índices**. Remote Sensing of Environment, 83:195-213. 2002a.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São Paulo-SP. Editora Parêntese. 598p. 2009.

KAUFMAN, Y. J.; TANRE, D. **Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, v. 30, n. 2, p. 261–270, mar. 1992.

LEDA, V. C. **Modelagem da produtividade de cana-de-açúcar utilizando índices de vegetação**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Ciências Agrônômicas – UNESP, Campus Botucatu. 59f. 2016.

LEVERMANN, R. A., SOUZA, J. P. M. **Óleo de palma: o crescimento da indústria global**. Agroanalysis, v. 34, n. 08, p. 25-26. 2014.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN. J. W. **Remote sensing and image interpretation**. Seventh edition. Ed. Wiley. E-book. p. 736/770. 2015.

LINHARES, M. M. A. AMARAL, B. A. S, COSTA, A. P, ROCHA, N. C. C, CÂNDIDO, L, G. **Vant's aplicados ao monitoramento da evolução vegetativa de culturas agrícolas**. 2014. São Pedro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2014, Goiânia. Anais Eletrônicos. UFG, 2014.

MOLIN, J. P. **Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade**. Engenharia Agrícola, n.22, p.83-92, 2002.

MOLIN, J. P. AMARAL, L. R. COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**.1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto**. 4. Ed. Editora UFV. 422p. 2011.

MUELLER, T., SASSENATH, G. F. **GIS Applications in Agriculture, Volume Four: Conservation Planning**. Ed. CRC Press. Boca Raton, FL. 290p. 2015.

MÜLLER, A. A., FURLAN JÚNIOR, J., CELESTINO FILHO, P. A **Embrapa Amazônia Oriental e o agronegócio do dendê no Pará**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 67p. 2006.

NAUE, C. R.; MARQUES, M. W.; LIMA, N. B., GALVÍNCIO, J. D. **Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão**. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v.3, n.3, p.190-195. 2011.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Blucher. 1989.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher. 2010.

OIL WORLD. **Global Supply, Demand and Price Outlook for Vegetable Oils as well as for Palm Oil**. ISTA Mielke GmbH, OIL WORLD, Hamburg, Germany, 2017.

OIL WORLD. **Malaysian Production to Decline in July/Dec 2020**. Highlights of OIL WORLD WEEKLY N. 32. ISTA Mielke GmbH, OIL WORLD, Hamburg, Germany, 2020.

PEREIRA, V. S. **Entenda o que é Sensoriamento Remoto**. Auster Tecnologia. Acesso: <https://www.austertecnologia.com/single-post/Sensoriamento-Remoto>. Disponível em: 30/07/2020. 2019.

PINHO, R.C.; FARIAS, P.R.S.; RODRIGUES, K.C.V.; TINÔCO, R.S.; DOS SANTOS, A. V. F.; MARSSENA, R. T. P. **Distribuição espacial de *Rhynchophorus palmarum* em palma de óleo no Estado do Pará, Amazônia**. Revista de Ciências Agrárias, Belém, v. 59, n. 1, p. 22-31, 2016.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. 1.ed. São José dos Campos: Parêntese. v.1. 135 p. 2007.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p.176. 2012.

RAMALHO FILHO, A., MOTTA, P. E. F., FREITAS, P. L., TEIXEIRA, W. G. T. **Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura de dendezeiro na Amazônia**. EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro. p. 57-68. 2010.

RIBEIRO, J. G., MARINHO, D. F., ESPINOSA, J. W. M. **Agricultura 4.0: desafios à produção de alimentos e inovações tecnológicas**. Simpósio de Engenharia de Produção. UFG, Catalão-GO. 2018.

ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., & DEEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite)**. Third ErtS (Earth Resources Technology Satellite) Symposium, Greenbelt, Md, NASA (National Aeronautics and Space Administration). Anais.. São Paulo, Brazil. 1973.

RUDORFF, B. F. T., MOREIRA, M. A. **Sensoriamento Remoto Aplicado a Agricultura, Capítulo 9**. INPE, São José dos Campos. INPE-8984-PUD/62. 2002.

SOARES, J. A. C., SANTOS, A. V. F., FARIAS, P. R. S., MEDEIROS, L. R., GOMES, A. A. C. **Detection of Diseases in Oil Palm Plantations in the Brazilian Amazon through Orbital Image**. Journal of Agricultural Science. Canadian Center of Science and Education. Vol. 12, n. 4. 2020.

TELES, D. A. A. **Características físicas e rendimento mensal em óleo de cachos de duas cultivares de dendezeiro cultivadas, sob irrigação, no Cerrado do Distrito Federal**. 2014. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília. 2014.

TSCHIEDEL, M., FERREIRA, M. F. **Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens**. Artigo de revisão bibliográfica. Ciência Rural, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.



VIANA, J. L., ZOLIN, C. A., SILVA, V. Q. R., SOUZA, A. P. **Respostas fisiológicas e produtivas da palma de óleo irrigada em fase inicial de desenvolvimento.** Ver. Irriga, Botucatu, v. 24, n. 2, p. 405-423. 2019.

WANG, Q., ADIKU, S., TENHUNEN, J., GRANIER, A. **On the Relationship of NDVI with Leaf Area Index in a Deciduous Forest Site.** Remote Sensing of Environment, 94:244-255. 2005.

WHELAN, B. TAYLOR, J. **Precision agriculture for grain production systems.** Csiro publishing. 199p. 2013.

ZHANG, Q, **Precision agriculture technology for crop farming.** CRC Press. 382p. 2016.

## **CAPÍTULO 2: DETECTION OF DISEASES IN OIL PALM PLANTATIONS IN THE BRAZILIAN AMAZON THROUGH ORBITAL IMAGE**

Journal of Agricultural Science; Vol. 12, No. 4; 2020

ISSN 1916-9752 E-ISSN 1916-9760

Published by Canadian Center of Science and Education

### **Detection of Diseases in Oil Palm Plantations in the Brazilian Amazon through Orbital Image**

**João Almiro Corrêa Soares<sup>1</sup>, Artur Vinícius Ferreira dos Santos<sup>1</sup>, Paulo Roberto Silva Farias<sup>1</sup>, Leidiane Ribeiro Medeiros<sup>2</sup> & Adriano Anastácio Cardoso Gomes<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, Brazil

<sup>2</sup> Specialization Program in Geoprocessing Applied to Agroecology and to the Use of Natural Resource, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brazil

**Received: July 16, 2019**

**Accepted: February 5, 2020**

**Online Published: March 15,**

**2020 doi:10.5539/ URL: <https://doi.org/10.5539/>**

#### **ABSTRACT**

The detection of diseases in oil palm crops in the Brazilian Amazon represents a great challenge for the management of this crop in Brazil. The plantations in the State of Pará provide inputs for the food, cosmetics, agro-energy and biofuel industries, supplying Brazilian markets. In recent years, several factors such as pests, diseases and climate have interfered in the development of oil palm in the region, generating the need to adopt new techniques to detect and monitor such issues. In this work, spectral enhancements were carried out by simple reflectance and vegetation indices for four plots cropped on Companhia Palmares da Amazônia (CPA) farm, owned by Agropalma S.A. company in the municipality of Acará, in the state of Pará. The results allowed the identification of expressive patterns minimum and maximum reflectances of the studied plots, correlating with occurrences of diseases. The EVI index showed an excellent correlation with the occurrence of diseases. However, the NDVI and SAVI indexes showed adequate adjustments with the occurrence of diseases in 2017. The areas corresponding to the L36 and H27 plots showed higher occurrences of diseases, based on the analysis of reflectance through vegetation indices. It is concluded that the reflectance enhancements, NDVI, SAVI and EVI obtained by orbital sensors are efficient in the detection of diseases in the plots. The results allowed the identification of diagnostic anomalies of stresses in the plots, either by disease or other factor, allowing the decision making in an adequate time, therefore avoiding large scale eradication in the extensive areas in commercial palm oil plantations in Brazil.

**Keywords:** Amazon, farming monitoring, oil palm, spectral analysis

## RESUMO

A detecção de doenças nas plantações de palma de óleo na Amazônia brasileira, representa um grande desafio para o manejo desta cultura no Brasil. Os plantios existentes no Estado do Pará fornecem insumos para as indústrias de alimentos, cosméticos, agro-energia e biocombustíveis, suprindo os mercados do Brasil. Nos últimos anos, diversos fatores como pragas, doenças e clima interferiram no desenvolvimento da palma de óleo na região, gerando a necessidade de adoção de novas técnicas para detecção e monitoramento desses problemas. Neste trabalho, foram realizados realces espectrais por reflectância simples e índices de vegetação para quatro talhões plantados na fazenda Companhia Palmares da Amazônia (CPA), pertencente ao grupo Agropalma S.A, no município de Acará, estado do Pará. Os resultados permitiram a identificação de padrões expressivos refletâncias mínimas e máximas dos talhões estudados, correlacionando com ocorrências de doenças. O índice EVI apresentou ótima correlação com a ocorrência de doenças. Entretanto, os índices NDVI e SAVI mostraram bons ajustes com a ocorrência de doenças no ano de 2017. As áreas correspondentes aos talhões L36 e H27 apresentaram maior ocorrências de doenças, com bases nas análise de reflectância por índices de vegetação. Conclui-se que, os realces por reflectância, NDVI, SAVI e EVI obtidos por sensores orbitais, mostram-se eficientes na detecção de doenças nos talhões. Os resultados permitiram a identificação de anomalias diagnósticas de estresses nos talhões, seja por uma doença ou outro fator, possibilitando a tomada de decisão em tempo hábil, evitando a erradicação em larga escala nas extensas áreas em plantios comerciais de palma de óleo no Brasil.

**Palavras-chave:** palma de óleo, análise espectral, monitoramento agrícola, Amazônia

## 1. INTRODUCTION

Oil palm (*Elaeis guineenses* Jacq.) is an oleaginous palm native to Africa, grown in large scale in the Brazilian Amazon, in areas that have already been deforested. In the region, approximately 207 thousand hectares of cropped area is totalized, about 88% of the Brazilian crop where the largest oil production is found (ABRAPALMA, 2018).

In Brazil and in the Brazilian Amazon, the state of Pará is the largest producer of oil palm, particularly in the municipalities of Acará, Baião, Bujaru, Concórdia do Pará, Igarapé-Açu, Moju, São Domingos do Capim, Tailândia, and Tomé-Açu. The region is favored by ideal agro-climatic conditions and governmental support provided by the Sustainable Palm Oil Production Program in Brazil (ALVES et al., 2016).

Factors such as production and palm oil extraction rate are fundamental to the viability of crop investments, directly influencing the profitability of the companies that invest in this crop (TELES, 2014). Palm oil is obtained from the oil palm, which is an edible and balanced oil, extracted from the mesocarp, and the palm kernel oil, derived from the almond (BERGMANN et al., 2013). The growing world's demand for these oils is related to the consumer market that uses them in the food, cosmetics, hygiene and cleaning, agro-energy and biofuel industries. In this context of demand, about 80% of the production is directed to the food industry, such as margarines, creams, ice cream, biscuits, chocolates, fillers and substitutes of cocoa butter and cooking oil (ABRAPALMA, 2018).

Due to the increase in cropped areas and the recognized economic importance of the culture in the Brazilian Amazon, especially in the state of Pará (Brazil), there is a need for reliable, comprehensive, systematic and agile information on the oil palm, which has become even more crucial in the face of phytosanitary issues that strongly affect the productivity of these palms and decrease their expansion (DUARTE et al., 2008; PINHO et al., 2016). Among these phytosanitary limitations, we highlight insects, drill pests (*Rhynchophorus palmarum*, Linnaeus, 1764; and *Eupalamides cyparissias cyparissias* Fabricius, 1776), defoliators (*Opsiphanes invirae* Hubner, 1818), and oil palm diseases, such Fatal Yellowing (FY), red ring disease (*Bursaphelenchus cocophilus* Cobb, 1919), sudden wilt (*Phytophthora staheli* McGhee and McGhee, 1979) and vascular wilt (*Fusarium oxysporum* f. sp. *elaedis*) (FLOOD, 2006; MACIEL et al., 2015; ASSIS COSTA et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2018; MARTÍNEZ et al., 2019).

Most agronomic information related to the occurrence of diseases in Amazonian oil palm plantations is obtained manually and rudimentarily by means of field surveys performed by the so-called “pragueiros” or field agents, who range plant-to-plant, seeking the visual recognition of pests and diseases. As a result, work becomes expensive, time-consuming and subject to frequent mistakes. Such a model generally allows for late diagnosis, with no other curative action to be taken, resulting in destruction of the plant (GIESE et al., 1975; GOODELL, et al., 2014).

Among several techniques of aid for farm crop management, the use of remote sensing has shown promising results for rapid and efficient detection of diseased plants in small and large geographic areas (NAUE et al., 2011; ZHANG et al., 2019). It is a technology composed of sensors and platforms, capable of obtaining information from the surface without physical contact with it, and often at long distances, from satellites and manned aircraft. Thus, remote sensing has become an instrument of great potential, where its usefulness contributes in several studies such as vegetation, acting in precision agriculture through the monitoring and physiological and phenological studies of the plantation (NOVO, 2010; MAHLEIN, 2016; ZHANG et al., 2019).

For the evaluation and monitoring of agricultural crops, remote sensing allows spectral analyses through reflectance curves and vegetation indexes, qualifying this technique as relevant for agricultural management. Through the analysis of spectral parameters of the vegetation, with more attention to the visible and near infrared, the several vegetation indices allow the differentiation in several points of the agricultural and forest cultivation (PONZONI & SHIMABUKURO, 2007).

The understanding of the spectral behavior allows to extract information of the vegetation distribution, canopy structure, phenological state, stress conditions, nutrient deficiency, among others (PONZONI et al., 2012). The NDVI is an index that can be used in studies related to vegetation dynamics with more homogeneous values, besides being a good estimator of biomass. However, it can be influenced by atmospheric interferences (SOUZA & SILVA, 2016).

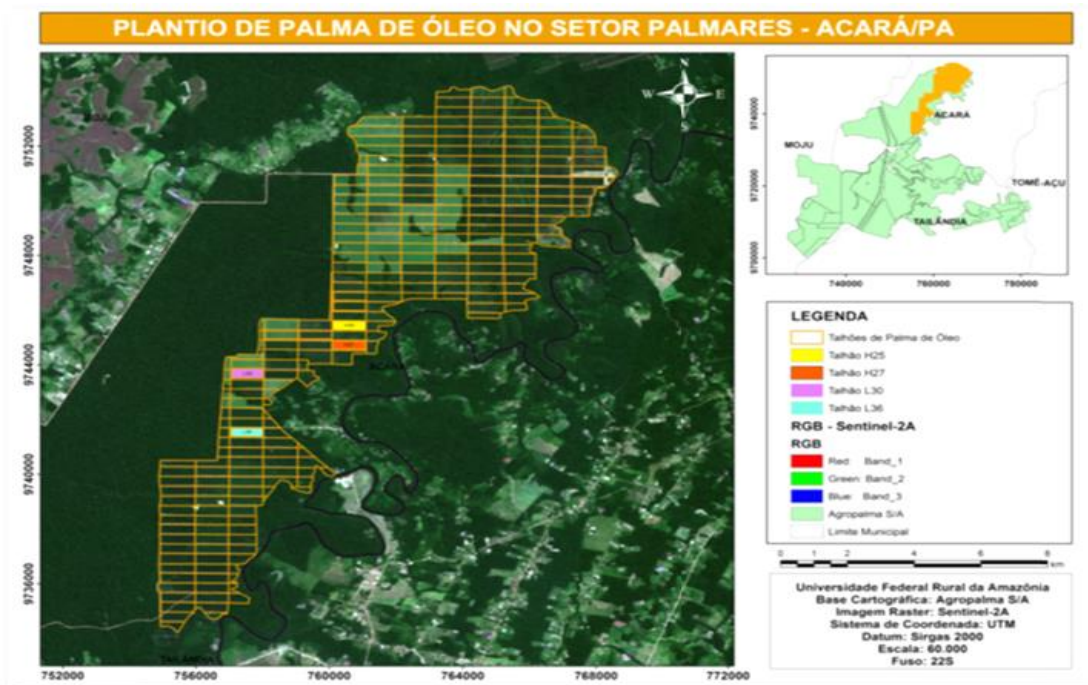
By considering the successive occurrences of pests and diseases in the oil palm in recent years (MACIEL et al., 2015; TORRES et al., 2016; MURGUÍA-GONZÁLEZ et al., 2018; MARTÍNEZ et al., 2019), and the great difficulties of their containment in the current management routines, it is important to consolidate a technique that is efficient and shows a rapid response for the detection of diseases in the extensive plantations of the region, starting with the present experiment carried out in plots in the municipality of Acará. Thus, this paper evaluates the efficiency of the Sentinel-2A MSI orbital sensor for the detection of anomalies caused by diseases in the palm oil crop in the municipality of Acará, representative of the crops in the

## 2. METHODOLOGY

### 2.1 Study Area

The study area is owned by Agropalma S.A., in municipality of Acará, located in the mesoregion of the Northeastern Para and microregion of Tomé-Açu, about 114 km away from Belém, capital of the state of Pará (PA), in the Brazilian Amazon (Figure 1). It has an estimated population of 55,513 thousand inhabitants and a territorial area of 4,343.550 km<sup>2</sup> (IBGE, 2018). The climate of the municipality corresponds to the megathermal, Am type according to the classification of Köppen, that is, hot and wet equatorial, with propensity to agropastoral activities. Besides, the favorable climate and abundance of water allowed many projects aimed at the production of palm oil. Rainfall ranges from 2,000 to 3,000 mm annually, with higher occurrences between December and April. The soil type is predominantly Yellow Latosol and medium clayey texture. This study was carried out in an area of cropped plots, located by the geographic coordinates 02°18'10.1" S and 48°39'40" W.

The experiments were carried out in the L30, L36, H25 and H27 plots, with individual areas of approximately 36 hectares owned by Companhia Palmares da Amazônia (CPA) company belonging to Agropalma S.A. (Figure 1), classified as mature conventional type crops at approximately 16 years of age, arranged in an equilateral triangle with spacing of 9 × 9 m.



**Figure 1:** Geographic localization of the study area.  
Source: the authors.

## 2.2 Experimental Database

### 2.2.1 Sentinel-2A MSI (Multi Spectral Instrument)

The Sentinel-2A image files, MSI (Multi Spectral Instrument) sensor were made available by Earth Explore USGS, dated July 25, 2017. The following bands were acquired: B2 (Spectral range Blue - 458-523 nm / 490 nm ) with sensitivity to dispersion of vegetation aerosols; B3 (Green spectral range - 543-578 nm/560 nm) sensitive to total chlorophyll of vegetation; B4 (Red spectral range - 650-680 nm /665 nm) sensitive to maximum absorption of chlorophyll; B8 (NIR spectral range - 785-900 nm/842 nm) sensitive to healthy vegetation and with full leaf structure; and B11 (Swir range - 1565-1655 nm / 1610 nm) sensitive to vegetation enhancement and exposed soil. Except for B11, all images were acquired by 10-m spatial resolution and low percentage of clouds.

### 2.2.2 Phytosanitary and Farming Data

It was made available for the present study, the database of occurrences of diseases arranged in spreadsheets produced by the phytosanitary sector of Agropalma S.A., referring to the occurrences of yellow and red wing infected plants and eliminated per between the years of 2013 and 2018.

## 2.3 Image Pre-processing

The Sentinel-2A images were processed through the following steps: 1) atmospheric correction; 2) transformation to 8 bits (256 NC); 3) georectification with 29 control points in the plot; 4) transformation of digital numbers (DN) into apparent reflectance values; and 5) generation of vegetation indices and reflectance images. The data processing phase was carried out at the Laboratory of Geoprocessing, Spatial Analysis and Satellite Monitoring (LAGAM) of the Federal Rural University of Amazonia, in Belém, state of Pará. Field work in the study area was carried out on February 27, 2018, and consisted in the collection of control point verification of the records of diseases in the evaluated plots.

## 2.4 Vegetation index generation

Vegetation indexes were extracted for four plots of the oil palm management area: L30, L36, H27 and H25. Three vegetation indexes were evaluated: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and Enhanced Vegetation

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is a spectral enhancement resulting from the combination of reflectance levels of red and infrared spectral bands. The NDVI can be used in studies related to vegetation dynamics with more homogeneous values, besides being a good estimator of biomass. However, it can be influenced by atmospheric interferences (SOUZA & SILVA, 2016). The NDVI, proposed by Rouse et al. (1973) was calculated through the following formula:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

Where,  $\rho_{NIR}$  is the reflectance of the vegetation in the near infrared band and  $\rho_{RED}$  is the vegetation reflectance in the red band. Leaf reflectivity in the NIR stems is the result of the presence of intracellular spaces in its structure, and the larger the number of space within the leaf, the greater the radiation reflectivity (JACKSON et al., 1983).

Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) is an improvement on NDVI, proposed by Heute (1988). It minimizes the effects of soil that partly influences NDVI, allowing the increase in the value of vegetation indices, especially in canopies with average levels of green cover. The constant “L” ranges from 0 to 1, according to the density of the vegetation. Thus, for low-density vegetation cover, the factor L is 1.0; medium coverage plant density, the factor will be 0.5; and for high densities, the L factor will be 0.25. The index proposed by Huete (1988) is calculated through the formula:

$$SAVI = \frac{(1 + L_S)(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L_S + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

Where  $\rho_{NIR}$  is the near infrared band,  $\rho_{RED}$  is the red band and L is the adjustment factor for the canopy substrate.

The Enhanced Vegetation Index (EVI), developed by Huete et al. (1997), seeks to improve vegetation sign by reducing soil and atmospheric interferences. It is very sensitive in regions with high biomass concentration. It is based on the following calculation:

$$EVI = G \cdot \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + C1 * \rho_{RED} - C2 * \rho_{blue} + L)} \quad (3)$$

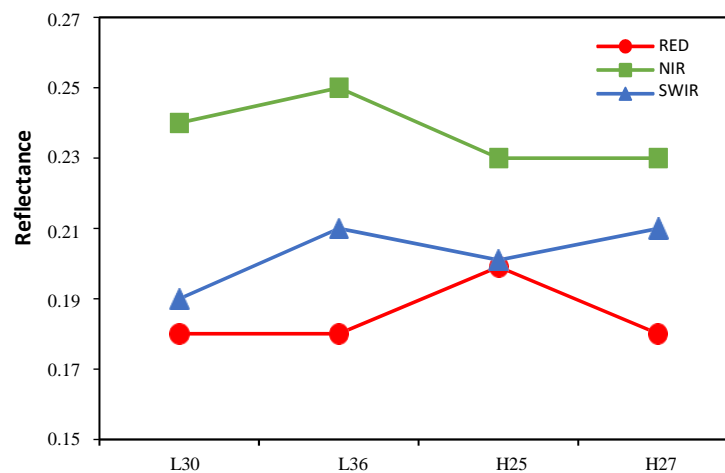


Where  $\rho_{NIR}$  is the near infrared band,  $\rho_{RED}$  is the band of red,  $\rho_{Blue}$  is reflectance in the blue region,  $G$  is the gain factor,  $C1$  and  $C2$  are adjustment coefficients for the aerosol effect of the atmosphere and  $L$  is the adjustment factor to the canopy substrate.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Spectral Characterization Through Reflectance Enhancement

Values of average reflectance were extracted from the L30, L36, H25 and H27 plots in Sentinel-2A images (Figure 2) (Table 1). The spectral band in the red band (RED) showed a lower reflectance average in the four plots, therefore, a higher absorption, indicating a RED radiation reception pattern for the plots due to the presence of photosynthetic pigments. However, the H25 plot displayed an anomalous pattern in relation to the other plots, with a greater reduction of the RED absorption, resulting in a strong collapse of chlorophyll and consequently an abnormal functioning of the plant, which is a response of the presence of diseases, pests or nutritional deficiency. The L30, L36 and H27 plots also showed low RED absorption.



**Figure 2:** Spectral characterization by reflectance enhancement of oil palm in L30, L36, H25 and H2 plots.

Source: the authors.

Table 1. Average reflectance values of oil palm in L30, L36, H25 and H27 plots.

<b>Bands</b>	<b>L30</b>	<b>L36</b>	<b>H25</b>	<b>H27</b>
RED	0.18175	0.17681	0.20787	0.17967
NIR	0.24479	0.25660	0.22831	0.23021
SWIR	0.19833	0.21872	0.20145	0.21092

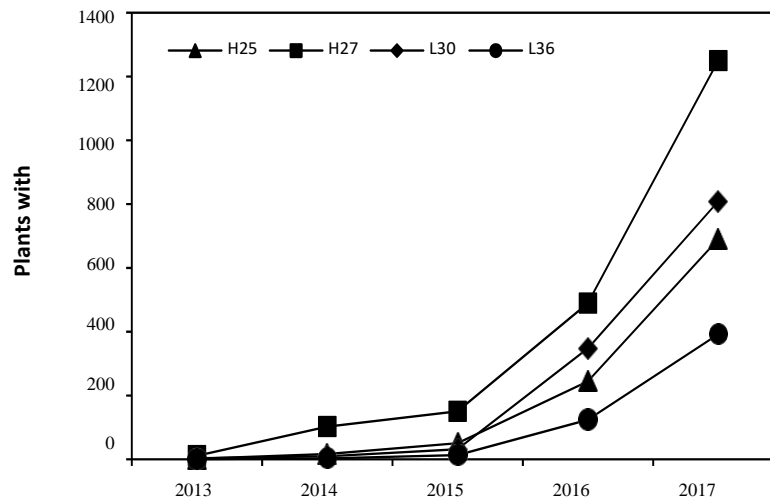
The high reflectance in the NIR band refers to the strong interaction between radiation and internal structure of the leaves of the oil palm, common to the vegetation. It can be seen in the Figure 2 and Table 1 that the standard reflectance in NIR is very pronounced in L36 plot, an indicative of greater vegetative vigor. However, the H25, H27 and L30 plots showed a low reflectance, so it can be inferred that there was more deterioration of the cellular structure of the oil palm. When related to oil palm sanity, the short-wave infrared (SWIR) band shows similar behavior to the NIR (Figure 2 and Table 1), corroborating with the low reflectance observed in the H25 and L30 plots and better vegetative vigor in L36. These analyses are confirmed by the incidence of infected plants in the plots (Figure 4).

Thus, this spectral characterization represents a viable technique for the detection of spectral anomalies, indicative of diseases, which were only identified with long field and laboratory works (AMARAL et al., 2009).

Table 1 shows that the reflectances in the RED band, in the H25 and H27 plots, considered with a higher degree of infection, are higher than those with healthy plants. The reflectance in the NIR region for more infected plots is lower than for areas with healthy plants (L30 and L36). This evidences that the contrast between the leaf reflectance in the RED and NIR bands can characterize the unequivocal presence of anomalies or not in the oil palm.

### 3.2 Detection of Diseases in the Oil Palm Through Vegetation Indexes

The use of vegetation indices in the monitoring of oil palm plantations will allow the early detection of anomalies associated with a variety of causes, including infection caused by red ring and fatal yellowing diseases, pests, water stress or nutritional deficiency. From 2013 to 2017, the incidence of plants infected with Fatal Yellowing (AF) increased, and in 2017, the highest occurrences (Figure 3) were observed. The application of the technique allowed to determine priority areas for emergency intervention in the crop management.

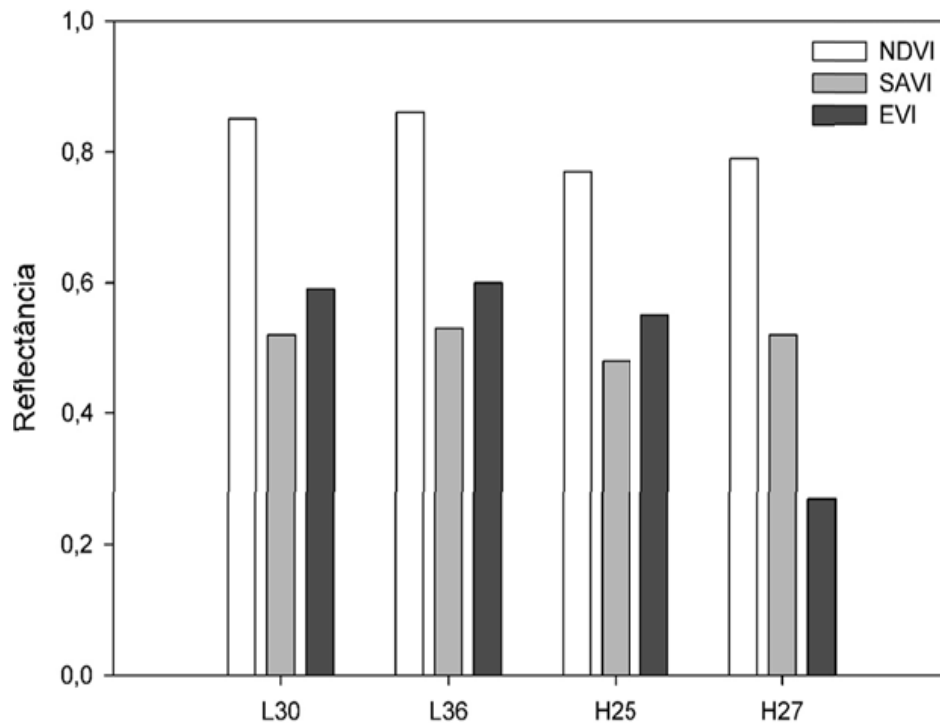


**Figure 3:** Fluctuation of the incidence of plants infected with Lethal Yellowing (LY) from 2013 to 2017, in oil palm plots L30, L36, H25 and H27, Acará, Brazil. Source: the authors.

The three indexes evaluated in this study allowed the identification of infected plants by any collapse factor, mainly caused by the diseases. In the four evaluated plots, anomalies referring to different symptoms or combination of symptoms were detected, thus, highlighting the occurrence of fatal yellowing. In this area of study, the width of canopies ranged from 8 to 16 meters for the adult plants, which generated a suitable pattern for area detection, compatible with the spatial resolution of the Sentinel-2A and the scale of this mapping. It was assumed that high index values (NDVI, SAVI and EVI) would be associated with increased photosynthetic activity and therefore, they could be used to discard the occurrence of infected plants (WULDER et al., 2006).

By considering the moment when the plant is not healthy, it tends to respond out the normal pattern of its levels of reflection and absorption in the leaf areas, therefore evidencing that the photosynthetic level and the absorbed radiation were affected. Modeling of vegetation indices is based on the opposite behavior of leaf reflectance in the RED band, that is, the higher the leaf density, the lower the reflectance as a function of the radiation absorption through the photosynthetic pigments, and the higher the plant density, the greater the reflectance in the different layers of the leaves (BORATTO & GOMIDE, 2013).

The NDVI data were discretized in the four plots, L30, L36, H25 and H27 for 2017, in order to detect infected areas in the mature oil palm. Results obtained in the NDVI, which are expressed with high reflectance in all plots, especially L36 and L30, show high maximum and minimum values (Figure 4).



**Figure 4:** NDVI, SAVI and EVI in oil palm plots L30, L36, H25 and H27.

Source: the authors.

The spectral pattern allows to infer a low occurrence of diseases in the dates prior to this experiment. However, for the plots H25 and H27 (Figure 5), lower values of maximum and minimum reflectance of NDVI are evident, with the minimum limits that do not allow the attribution of occurrence of diseases.

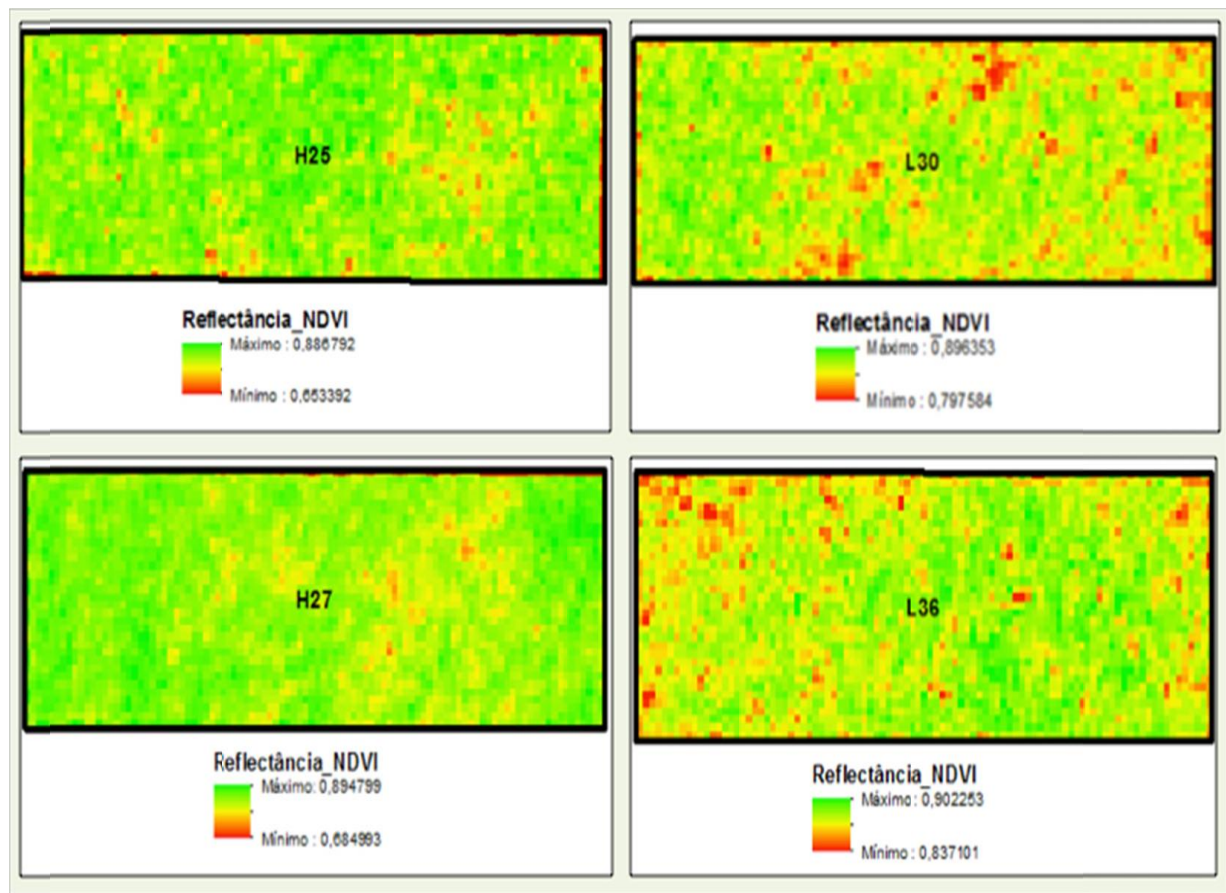
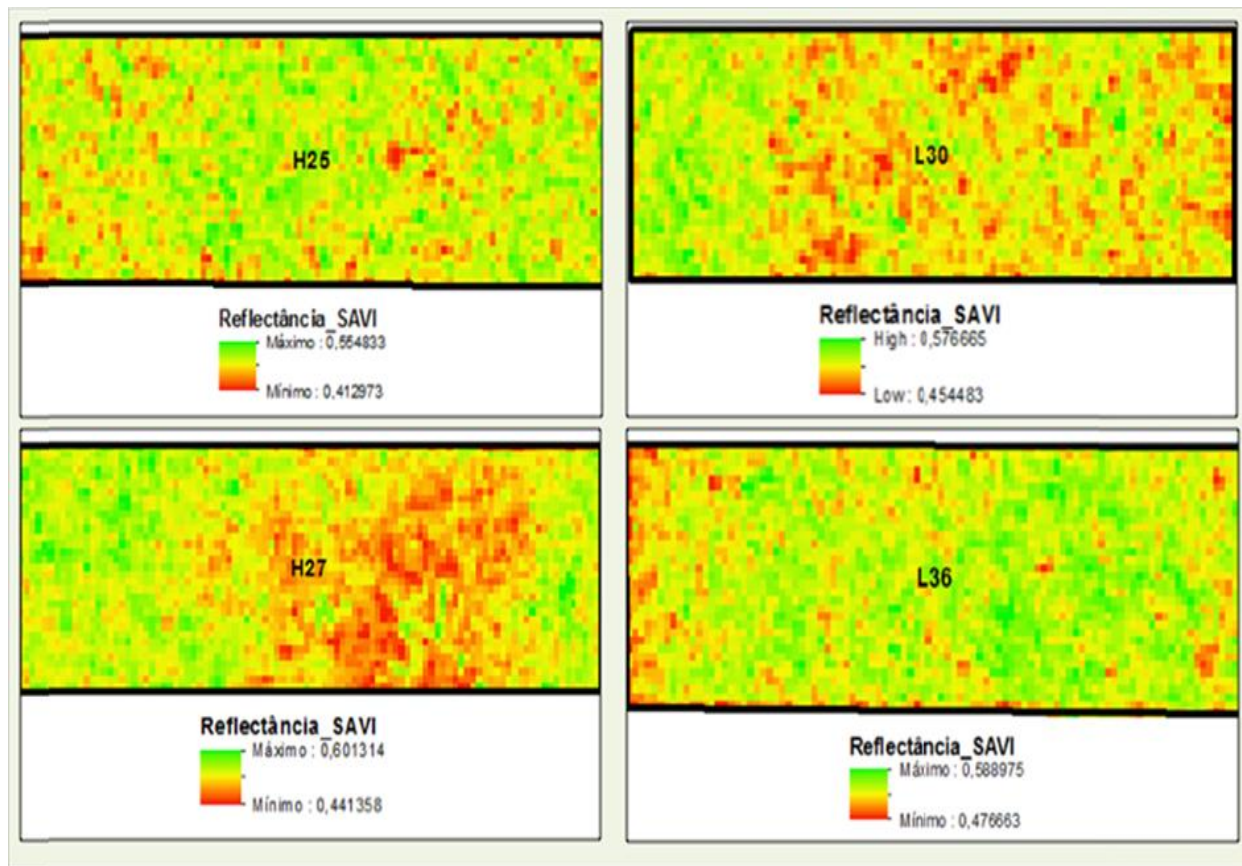


Figure 5. NDVI intensity spatial distribution in oil palm plots L30, L36, H25 and H27 in conventional oil palm crops, Acará (PA), Brazil.

Source: the authors.

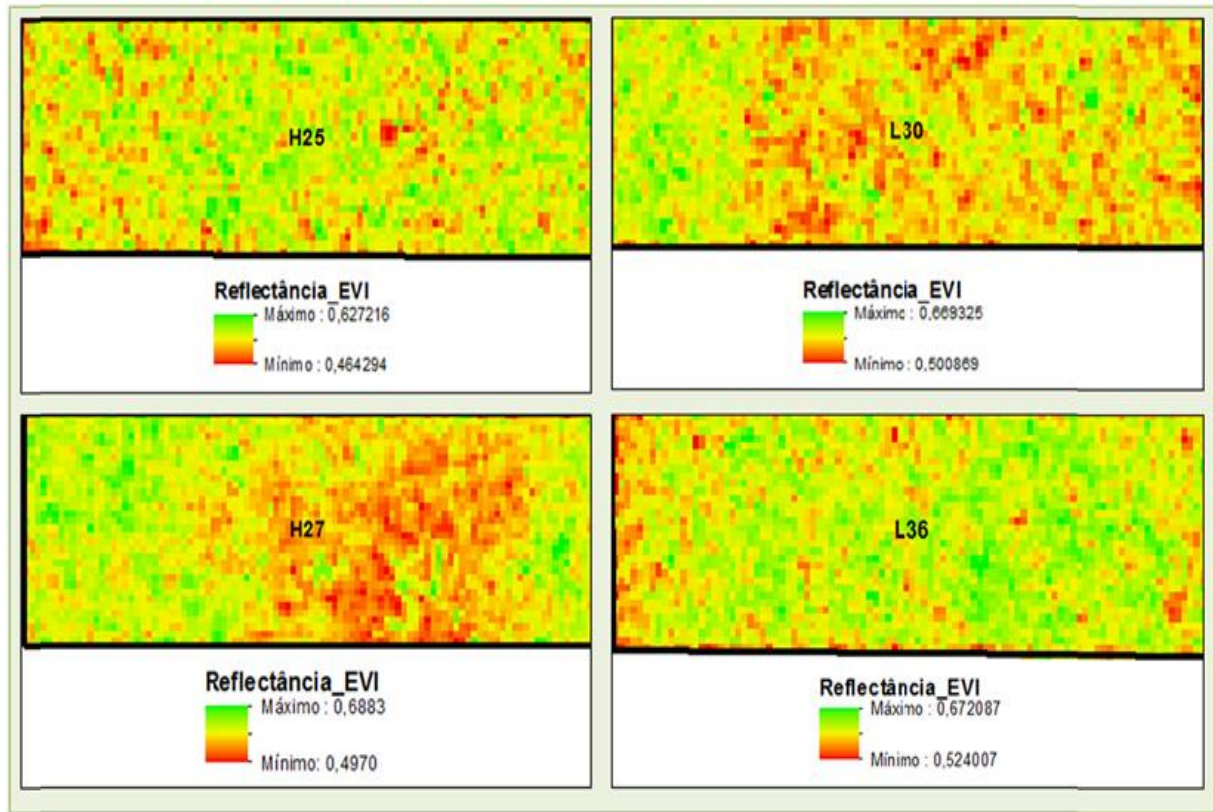
Visualization of the SAVI maps highlighted low reflectance areas, which were significant for the diagnosis of disease, especially in the L30 and H27 plots, with maximum and minimum SAVI values pointing to anomalies in these areas (Figure 6). It can be observed that SAVI maintained an excellent correlation with the occurrences of FA observed in Figure 4. Regarding NDVI, SAVI showed better discrimination of impacted zones and intensity of occurrences. This SAVI performance may be associated to the fact that this index minimizes the effects of soil in the areas of the plots since an increase in the diagnosis of diseases in the last years, in some cases, resulted in the eradication of some plants.



**Figure 6:** SAVI spatial distribution intensity in oil palm plots L30, L36, H25 and H27 in conventional palm oil crops, Acará (PA), Brazil.

Source: the authors.

The analysis of the EVI reflectance (Figure 3) clarifies that the plot that presented the greatest anomaly representative of diseases was H27. Figure 7 strongly emphasizes the pixel areas with low reflectance in the EVI images in the L30 and H27 plots, indicative of the high presence of diseases. There were 1249 and 808 documented cases of fatal yellowing in H27 and L30 plots, respectively (Figure 4). In comparison to NDVI and SAVI, the EVI showed an excellent performance in the discrimination of the most impacted zones as EVI improved the vegetation signal, attenuating the influence of the atmosphere and the soil on the canopy of the oil palm in this region in the Amazon.



**Figure 7:** Spatial distribution of EVI intensity in oil palm L30, L36, H25 and H27 plots in conventional oil crops, Acará (PA), Brazil.

Source: the authors.

According to Santos et al. (2011), vegetation index analysis of orbital images provides general accuracy of about 80% for the mapping of disease infection in oil palm crops. The results obtained by this experiment will allow the definition of a practical methodology or a model for the monitoring of the oil palm crop in the Brazilian Amazon. The favorable correlation between vegetation index reflectance levels and occurrence of disease in the assessed area shows the potential of Sentinel-2A images, confirmed by the clear expression of L36 and H27 reflectance extremes. This situation allows to minimize or confirm the occurrence of diseases.

#### 4. CONCLUSION

This study approached the spectral enhancement through vegetation indices to determine the unequivocal viability of remote sensing techniques in the detection of diseases in oil palm. In this approach, Sentinel 2-A orbital images were effective in monitoring and indicating areas for detailed assessment, saving time and financial resources in oil palm management. Medium-resolution orbital images can be widely used to detect areas with disease infection or occurrence of pests in the oil palm. Enhancements through vegetation indices can systematically discriminate the areas with healthy and infected plants.

Enhancements through simple reflectance as well as NDVI, SAVI and EVI were efficient in the detection of diseases in the oil palm, especially the detection in L30 and H27 plots in the study area. The curves generated through NDVI, SAVI and EVI proposed an analysis that allows the identification of diagnostic anomalies of stresses in the plots, either by disease or other factor, allowing adequate time for remediation actions that avoid plant eradication.

Other studies in this direction for crops in Brazil should enable spectral detailing of the diseased and healthy oil palm, the different maturity stages and genetic varieties in the Brazilian Amazonian crops. This characterization should improve the accuracy of detection methods through spectral analysis.



## REFERENCE

- ABRAPALMA - Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/en/palm-oil-in-everyday-life>. Acesso em 6 mar. 2018.
- ALVES, R. N. B., MODESTO JÚNIOR, M. S., MAGALHÃES, J., BANDEIRA, B. **Análise comparativa dos custos de implantação do cultivo de dendê solteiro e consorciado com mandioca.** Amazônia: Ciência & Desenvolvimento, Belém, v. 12, n. 22, p. 9-20. 2016.
- AMARAL, C. H., LONGHITANO, G. A., ALMEIDA, T. I. R. **Estudo de fisiologia da vegetação com uso de imagem hiperespectral.** In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais. INPE, 2515-2522. 2009.
- ASSIS COSTA, O. Y., TUPINAMBÁ, D. D., BERGMANN, J. C., BARRETO, C. C., & QUIRINO, B. F. **Fungal diversity in oil palm leaves showing symptoms of Fatal Yellowing disease.** PLoS ONE, 13(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191884>. 2018.
- BERGMANN, J. C., TUPINAMBA, D. D., COSTA, O. Y. A., ALMEIDA, J. R. M., BARRETO, C. C., & QUIRINO, B. F. **Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks.** Renew Sust Energ Rev., 21, 411-20. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.058>. 2013.
- BORATTO, I. M. DE P., GOMIDE, R. L. **Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais.** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu. Anais... INPE. 2013.
- DUARTE, A. G., LIMA, I. S., ARAÚJO JR. J. V., DUARTE, A. G. ALBUQUERQUE, A. L. S., & CRUZ, M. M. **Disposição do nematoide Bursaphelenchus cocophilus (Cobb) baujard, em coqueiros portadores da doença anel-vermelho.** Revista Brasileira de Fruticultura, 30(3), 622-627. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000300010>. 2008.
- FLOOD, J. **A Review of Fusarium Wilt of Oil Palm Caused by Fusarium oxysporum f. sp. elaeidis.** Phytopathology, 96(6), 660-662. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0660>. 2006.
- GIESE, R. L., PEART, R. M., & HUBER, R. T. **Pest Management.** Science, 187, 1045-1052. 1975.
- GOODELL, P. B., ZALOM, F. G., STRAND, J. F., WILEN, C. A., & WINDBIEL-ROJAS, K. **Over 35 years, integrated pest management has reduced pest risks and pesticide use.** California Agriculture, 68(04), 153-157. <https://doi.org/10.3733/ca.v068n04p153>. 2014.
- HUETE, A. R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI).** Remote Sensing of Environment, 25, 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). 1988.
- HUETE, A. R., LIU, H. Q., BATCHILY, K., & VAN LEEUWEN, W. **A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS.** Remote

Sensing of Environment, 59, 440-451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5). 1997.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Retrieved from <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/acara/panorama>. 2018.

JACKSON, R. D., SLATER, P. N., & PINTER, P. J. J. R. **Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres.** Remote Sensing of Environment, 13, 187-208. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(83\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90039-1). 1983.

MACIEL, A. S., GARBELOTTO, T. A., WINTER, I. C., ROELL, T., & CAMPOS, L. A. **Description of the males of *Lincus singularis* and *Lincus incisus* (Hemiptera: Pentatomidae: Discocephalinae).** Zoologia (Curitiba), 32(2), 157-161. <https://dx.doi.org/10.1590/S1984-46702015000200007>. 2015.

MAHLEIN, A. K. **Plant Disease Detection by Imaging Sensors—Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping.** Plant Disease, 100(2), 241-251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>. 2016.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil. **Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil.** Brasília: MAPA/ACE. 2018.

MARTÍNEZ, L. C., PLATA-RUEDA, A., RODRÍGUEZ-DIMATÉ, F. A., CAMPOS, J. M., SANTOS JÚNIOR, V. C., ROLIM, G. D. S., SERRÃO, J. E. **Exposure to Insecticides Reduces Populations of *Rhynchophorus palmarum* in Oil Palm Plantations with Bud Rot Disease.** Insects, 10, 111. <https://doi.org/10.3390/insects10040111>. 2019.

MURGUÍA-GONZÁLEZ, J., LANDERO-TORRES, I., LEYVA-OVALLE, O. R., LLARENA-HERNÁNDEZ, R. C., PRESA-PARRA, E., GARCÍA-MARTÍNEZ, M. A. **Efficacy and Cost of Trap-Bait Combinations for Capturing *Rhynchophorus palmarum* L.(Coleoptera: Curculionidae) in Ornamental Palm Polycultures.** Neotropical Entomology, 47, 302-310. <https://doi.org/10.1007/s13744-017-0545-8>. 2018.

NASCIMENTO, S. V., MAGALHÃES, M. M., CUNHA, R. L., COSTA, P. H. O., ALVES, R. C. O., OLIVEIRA, G. C., & VALADARES, R. B. S. **Differential accumulation of proteins in oil palms affected by fatal yellowing disease.** PLoS ONE, 13(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195538>. 2018.

NAUE, C. R., MARQUES, M. W., LIMA, N. B., & GALVÍNCIO, J. D. **Sensoriamento remoto como ferramenta aos estudos de doenças de plantas agrícolas: uma revisão.** Revista Brasileira de Geografia Física, 3(3), 190-195. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20100018>. 2011.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações (4th ed.).** São Paulo: Blucher. 2010.

PINHO, R. C., FARIAS, P. R. S., RODRIGUES, K. C. V., TINÔCO, R. S., DOS SANTOS, A. V. F., MARSSENA, R. T. P. **Distribuição espacial de *Rhynchophorus***

**palmarum em palma de óleo no Estado do Pará, Amazônia.** Revista de Ciências Agrárias, 59(1), 22-31. <https://doi.org/10.4322/rca.2116>. 2016.

PONZONI, F. J., & SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação** (1st ed., Vol. 1, p. 135). São José dos Campos: Parêntese. 2007.

PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E., & KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação** (2nd ed., Vol. 1, p. 176). São Paulo: Oficina de Textos. 2012.

ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., & DEEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite)** (pp. 309-317). Third ERTS (Earth Resources Technology Satellite) Symposium, Greenbelt, Md, NASA (National Aeronautics and Space Administration), 1973, São Paulo. Anais... São Paulo, Brazil. 1973.

SANTOS, H., GUNAWAN, T., JATMIKO, R. H., DARMOSARKORO, W., & MINASNY, B. **Mapping and identifying basal stem rot disease in oil palms in north sumatra with QuickBird imagery.** Precision Agriculture, 12, 233-248. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9172-7>. 2011.

SOUZA, J. F., & SILVA, R. M. **Análise de perfis temporais de NDVI e EVI em diferentes usos do solo no município de Goiana-PE.** OKARA: Geografia em Debate, 10(3), 604-619. 2016.

TELES, D. A. A. **Características físicas e rendimento mensal em óleo de cachos de duas cultivares de dendezeiro cultivadas, sob irrigação, no Cerrado do Distrito Federal** (76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Brasília, Brasília). 2014.

TORRES, G. A., SARRIA, G. A., MARTINEZ, G., VARON, F., DRENTH, A., GUEST, D. I. **Bud rot caused by Phytophthora palmivora: A destructive emerging disease of oil palm.** Phytopathology, 106, 320-329. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-15-0243-RVW>. 2016.

WULDER, M., WHITE, J., BENTZ, B., EBATA, T. **Augmenting the existing survey hierarchy for mountain pine beetle red attack damage with satellite remotely sensed data.** Forestry Chronicle, 82(2), 187-202. <https://doi.org/10.5558/tfc82187-2>. 2006.

ZHANG, T., SU, J., LIU, C., & CHEN, W. **Potential Bands of Sentinel-2<sup>a</sup> Satellite for Classification Problems in Precision Agriculture.** International Journal of Automation and Computing, 16(1), 16-26. <https://doi.org/10.1007/s11633-018-1143>. 2019.

### Copyrights

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### **CAPÍTULO 3: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTAÇÕES DE PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA ATRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS**

#### **ARTIGO 1: ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTIOS JOVENS DE PALMA DE ÓLEO CONVENCIONAL POR SENSOR ORBITAL NO MUNICÍPIO DE TAILÂNDIA-PA**

##### **RESUMO**

A estimativa da produtividade, como suporte para projeções ou previsões de safra, é comumente realizada por meio de coletas de informações em campo, geralmente imprecisas, demoradas e com alto custo de execução. Neste contexto, tem-se o sensoriamento remoto com grande potencial para estimar a produtividade do óleo de Palma por meio de índices de vegetação. Objetivo deste experimento foi estimar a produtividade de plantios no início da vida produtiva da palmeira, para posterior correlação com plantios maduros. Foi utilizada uma imagem do sistema Rapideye referente as áreas de manejo com oito talhões produtivos localizados no município de Tailândia-PA, pertencentes ao grupo Agropalma S.A. Os dados de campo referentes a produtividade contabilizada na colheita foram coletados por funcionários da empresa e serviram para correlação com os resultados estimados remotamente. A partir das imagens do ano de 2014 foram derivados os índices de vegetação: NDVI, EVI, ARVI e RENDVI. Empregou-se o método estatístico de regressão linear para os quatro índices analisados, para correlações com as produtividades medidas no plantio. Preliminarmente o EVI e o NDVI apresentaram melhor correlação com o rendimento observado em campo, demonstrando potencial para estimar a produtividade. A validação do método foi realizada através do erro médio Quadrático - RMSE, o qual considerou satisfatório em se tratando de estimativa de produtividade, confirmando potencial eficácia do sensoriamento remoto orbital para pesquisas relacionados predição produtiva ou de safras.

**Palavras-chaves:** Predição de produtividade, Índice de Vegetação, Agricultura de Precisão.

## **ABSTRACT**

Estimation of productivity, as a support for crop projections or forecasts, is commonly carried out by collecting information in the field, which is generally inaccurate, time-consuming and has a high cost of execution. In this context, there is remote sensing with great potential to estimate the productivity of palm oil through vegetation indexes. The objective of this experiment was to estimate the productivity of plantations at the beginning of the productive life of the palm, for later correlation with mature plantings. An image of the Rapideye system was used referring to the management areas with eight productive plots located in the municipality of Thailand-PA, belonging to the Agropalma SA group. The field data referring to the productivity counted in the harvest were collected by company employees and served to correlate with the estimated results remotely. Vegetation indexes were derived from 2014 images: NDVI, EVI, ARVI and RENDVI. The statistical method of linear regression was used for the four indexes analyzed, for correlations with the productivity measured at planting. Preliminarily, the EVI and NDVI showed better correlation with the yield observed in the field, showing the potential to estimate productivity. The validation of the method was carried out through the mean Quadratic Error - RMSE, which was considered satisfactory when it comes to estimate of productivity, confirming the potential effectiveness of remote orbital sensing for research related to productive or crop prediction.

**Keywords:** Productivity prediction, Vegetation Index, Precision Agriculture.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas quatro décadas a palmicultura obteve um notável avanço na mesorregião do Nordeste Paraense, com produção que passou a atender a demanda nacional através da consolidação de extensos cultivos de palma de óleo. Para ser ter um parâmetro da importância do óleo de palma, dos dezessete óleos vegetais mais comercializados no mercado internacional, o óleo de Palma é o líder mundial em comércio e consumo entre os óleos comestíveis, com lucros superiores a US\$ 50 bilhões aos produtores ao redor do mundo. A cultura da Palma ainda se destacada por promover benefícios socioeconômicos, como geração de emprego e renda, onde aproximadamente dez hectares cultivados emprega um trabalhador (LEVERMANN & SOUZA, 2014).

Em razão da importância econômica atual do óleo de Palma, a rapidez na estimativa da produtividade e na consolidação de modelos preditivos nas áreas de cultivo é fundamental para o planejamento dos ciclos de produção em campo. Um modelo baseado em estimativa remota pode antecipar a confirmação de expectativas positivas de produção ou servir com indicador de perdas futuras. Tradicionalmente o cálculo de produção é obtido, em geral, do conhecimento dos agricultores ou a partir de procedimentos de amostragem em áreas representativas. Entretanto, esses métodos são imprecisos e demorados.

Com o surgimento do sensoriamento remoto, iniciou-se o uso de diversas técnicas e metodologias capazes de perceber as mudanças e variações na cobertura da superfície, por meio de imagens e dados orbitais. Tais ensaios têm se mostrado eficientes para estudos relacionados à dinâmica da cobertura vegetal e dos cultivares (RAMOS, 2013). Varella et al. (2011) consideraram que dentre as diversas abordagens propostas para a estimativa de produtividade com utilização do sensoriamento remoto, os índices de vegetação ou refletância na região do infravermelho próximo demonstraram eficiência na estimação da produtividade, em relação a sua correlação com a produção de em campo.

Na obra de Jensen (2009), fica nítido que as combinações da refletância dos alvos em pelo menos duas porções espectrais, nas regiões do visível e infravermelho, produzem medidas radiométricas adimensionais que geram os índices de vegetação. Existem inúmeros índices de vegetação até hoje propostos, com objetivo de realçar características da vegetação tais como: área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila,

biomassa verde e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida. Vale frisar que, nos últimos anos, diversos estudos têm avaliado a correlação entre a produtividade e a reflectância de dosséis por meio de índices de vegetação, na perspectiva de estabelecer uma modelagem que permita estimar a produtividade agrícola com maior eficiência, a qual faça uso de imagens de sensores remotos, geoprocessamento e técnicas estatísticas. Entretanto, também se faz necessário correlacionar tais resultados com episódios de infestação por doenças e pragas ou anomalias climáticas.

Neste contexto, o presente artigo objetiva analisar a aplicabilidade de diversos índices de vegetação, a partir de imagens orbitais, em plantios jovens de palma de óleo para a determinação da produtividade e sua comparação com os cálculos convencionais de rendimento adotados no manejo atual no município de Tailândia-PA. Especificamente pretende-se obter o melhor produto de estimação, em termos de acurácia, bem como possibilitar sua correlação, futura, com plantações de outras idades produtivas na região. Desta forma, o pioneirismo deste experimento na palma de óleo da região visa consolidar uma metodologia que possa ser aplicável na rotina operacional do manejo local.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na propriedade da empresa Agropalma S.A no município de Tailândia, microrregião de Tomé-Açu, e corresponde a oito talhões jovens e produtivos da Fazenda CRAI (Companhia Real Agroindustrial S.A) (Figura 1). Representa uma das áreas de produção composta por plantios convencionais de idades entre 3 e 6 anos. A tabela apresenta as características espaciais dos talhões de Palma de óleo da área de estudo.

**Tabela 1:** Características dos talhões da área de estudo.

Talhão	Idade de Plantio	Localização		Área (ha)
		X(m)	Y(m)	
B08	Palma de óleo de 3 a 6 anos	766765,754483	9751419,669760	32,60
B09		752039,911	9.719.815,488	34,00
B10		766757,696324	9750682,484500	34,00
C07		765750,892172	9751783,981400	34,00
C08		765746,461709	9751428,602070	33,90
C10		765737,144914	9750694,643200	30,20
C11		765733,367472	9750336,004330	31,90
C12		765728,550572	9749978,418380	32,10

Na área ocorrem solos do tipo latossolo amarelo e textura argilosa média, com um teor de argila variando de 15% a 35% (EMBRAPA, 2006; EMBRAPA, 2018). O clima da região é do tipo tropical-úmido corresponde ao megatérmico tipo Am da classificação de Köppen. Ocorre uma precipitação média de 2.076,4 mm, estabelecidas em uma frequência de aproximadamente 140 dias por ano, com período chuvoso de dezembro a maio, tendo seu maior pico entre os meses de fevereiro e abril; e período seco se estendendo de junho a novembro de cada ano (RODRIGUES, 2005). A temperatura média anual varia em torno de 26° C e nos meses mais quentes (agosto a novembro) oscila em torno de 27°C, já nos meses entre janeiro e março, a temperatura média ameniza para torno de 25°C (RODRIGUES, 2005).

O relevo local é predominantemente plano (declives entre 0% a 3%) e suave ondulado (declives de 3% a 8%), seguidos por um relevo ondulado (declive de 8% a 25%). Apresenta uma topografia levemente dissecada e ocorrência de colinas e ravinas bastante drenadas (RODRIGUES, 2005).



**Figura 1:** Localização da área de estudo, Fazenda CRAI (Agropalma S.A).  
Fonte: Adaptado de IBGE (2018).



## 2.2 Base de dados

Neste experimento foi utilizada uma cena orbital Rapideye obtida em 20 de junho de 2014, através do geocatálogo do Ministério do Meio Ambiente do Brasil-MMA, reversava a UFRA para uso em pesquisa. A imagem, corresponde ao código de localização 2237925, possui resolução espacial de 6,5 metros composta das seguintes bandas espectrais: Banda 1 (440-510 nm), Banda 2 (520-590 nm), Banda 3 (630-685 nm), Banda 4 (690-730 nm), Banda 5 (760-850 nm). A imagem foi georreferenciada e submetidas a correção atmosférica, para em seguida haver a conversão de DN dos píxels para valores de reflectância. Após a realização do pré-processamento, foram realizadas as operações aritméticas para geração dos índices de vegetação.

Os dados de produtividade de palma registrados em toneladas por hectare, dos 8 talhões de estudo, foram disponibilizados em planilhas Excel pelo setor agrícola da Agropalma S.A, registrados a partir do manejo diário nas plantações, entre os anos de 2003 e 2015.

## 2.3 Geração dos Índices de Vegetação

Inicialmente foi gerado o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) que é a normalização do índice razão simples entre a banda do vermelho e infravermelho, variando entre -1, em superfícies d'água, e 1, representando superfícies densamente vegetadas, dado pela relação já mencionado na Equação (1):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

Na qual, o  $\rho_{NIR}$  corresponde a Banda 5 Rapideye e  $\rho_{RED}$  corresponde a banda 3, gerando assim a imagem de NDVI.

Também foi calculado o índice de vegetação EVI, que tem como finalidade atenuar os efeitos do solo e da atmosfera sobre o monitoramento da vegetação. O EVI melhora a sensibilidade nas regiões de alta biomassa, com melhor desempenho para monitoramento da vegetação, reduzindo a influência do sinal do substrato abaixo do dossel, bem como através da redução da influência atmosférica (HUETE et al.,1997; HUETE et al., 2002.). É calculado pela relação da Equação (2):

$$EVI = G \cdot \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + C1 * \rho_{RED} - C2 * \rho_{blue} + L)} \quad (2)$$

Onde, o G é um fator ajustado pelo valor de 2,5. E os dois coeficientes (C1, C2) que descreve o uso da banda azul para a correção da banda do vermelho, esses coeficientes assumem valores de (6,0 e 7,5) respectivamente. Já o fator de ajuste para o solo (L) foi determinado o valor de 0.5, sendo *PNIR* correspondente a Banda 5 e *PRED* a banda 3, gerando a imagem EVI.

Em seguida foi realizado o processamento para gerar o índice de vegetação resistente a atmosfera (ARVI), o qual usa a diferença de radiância entre o canal azul e o canal vermelho para reduzir os efeitos atmosféricos. A reflectância no vermelho é menor que no infravermelho próximo, assim sendo susceptível aos efeitos atmosféricos. Desta forma, utiliza-se a radiância na região do vermelho-azul (Pred Pblue) mais resistente aos efeitos atmosféricos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007), ao invés da radiância no vermelho (como no NDVI) que. O ARVI é calculado pela seguinte Equação (3):

$$ARVI = \frac{(P_{nir} - (2 * P_{red} - P_{blue}))}{(P_{nir} + (2 * P_{red} - P_{blue}))} \quad (3)$$

O *Pnir* equivalente a banda 5, *Pred* a banda 3 e *Pblue* a banda 1.

Por último o índice RENDVI, que foi obtido pela Equação (4):

$$RENDVI = \frac{(P_{nir} - P_{red\ edge})}{(P_{nir} + P_{red\ edge})} \quad (4)$$

Sendo o *Pnir* correspondente a banda 5, conforme citado anteriormente e *Pred edge* a banda 4.

## 2.4 Correlação índices de vegetação e produtividade

Sendo os índices de vegetação resultados da associação entre os parâmetros biofísicos das culturas e a radiação eletromagnética, é perfeitamente possível estabelecer correlação dos mesmos com a produtividade das lavouras.

### 2.4.1 Regressão linear

Neste estudo, foi utilizado modelo proposto por Montgomery et al. (2001), bastante utilizado na área agrícola, buscando as devidas adaptações para estimar a

produtividade da palma de óleo na área de estudo. A regressão linear é representada pela Equação (5):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (5)$$

Onde:  $\beta_0$  (coeficiente de intercepto) corresponde à média de  $Y$  quando as demais variáveis equivalem a zero, e o coeficiente  $\beta_1$  (podendo até  $\beta_n$  em caso de múltipla) representa o coeficiente de regressão parciais. A equação de regressão linear simples é representada pelo coeficiente de determinação  $R^2$ . Desta forma, foi aplicada a equação (6):

$$R^2 = \frac{\text{variância de } Y \text{ explicada pela análise de regressão}}{\text{variância total}} \quad (6)$$

$R^2$  é um coeficiente de determinação que representa a medida dimensional de quantidade do ajuste do modelo aos dados. Seus valores variam entre 0 e 1. Assim, se  $R^2$  for próximo de 1, as variáveis medidas respondem quase que totalmente pela variação de  $Y$  (LANDIM, 1998).

Na prática a análise estatística, através do software *InfoStat* (versão aluno), gerou o gráfico de regressão linear para a modelagem da equação que foi aplicada novamente aos índices de vegetação, sendo deste modo foi possível estimar a produtividade. Os resultados permitiram ainda determinar de quais imagens-índices se obteve variações que melhor explicam a variabilidade dos dados de produtividade, com maior coeficiente de determinação  $R^2$ . Os índices com melhor correlação com os valores de produtividade, foram os que apresentaram elevado valor do determinante  $R^2$  como pode ser observada na Equação (7):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mod,i})^2}{n}} \quad (7)$$

Onde  $n$  é o número de talhões;  $X_{obs}$  é a produtividade observada; e  $X_{mod}$  representa a produtividade estimada. O RMSE é a raiz do erro médio quadrático da diferença entre a estimada e a observada, e representa a medida de erro usada para aferir a qualidade do ajuste do modelo.

### 2.4.2 Coeficiente de Pearson

A correlação real entre o índice de vegetação e a produtividade de dendzeiros foi calculada pelo Coeficiente de Pearson que mede o grau da correlação entre as duas variáveis. Como a correlação é uma relação entre duas variáveis medidas em um certo número de indivíduos, foram inseridos dados em um diagrama de dispersão com eixos cartesianos onde os pontos deverão alinhar-se em uma reta. Com isso, é possível a produção de uma equação linear para análise de correlação entre duas variáveis, estimando-se uma variável em relação a outra (LANDIM, 1998).

As imagens índices que apresentaram os maiores valores de correlação foram as selecionadas para a modelagem da produtividade. O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado segundo a formula (8):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (8)$$

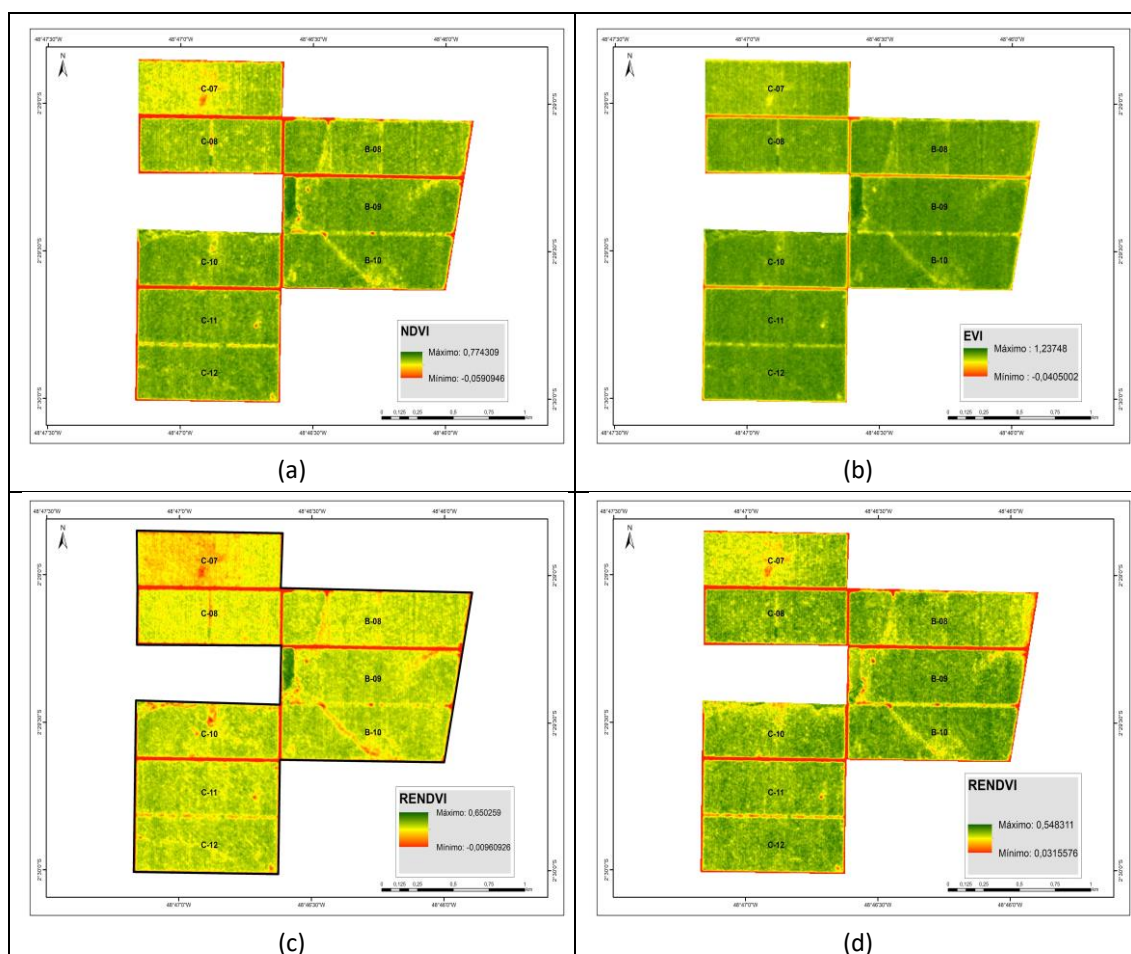
Onde  $x_i$ ,  $\bar{x}$  e  $y_i$ ,  $\bar{y}$  representam os valores medidos de ambas as variáveis.

Os valores do resultado da correlação são adimensionais, variando entre -1 e +1, que é inverso (-) ou direto (+), respectivamente. O sinal indica a direção, se a correlação é positiva ou negativa, e o tamanho da variável indica a força da correlação. Valores próximos de zero significam que não há relação linear entre as duas variáveis.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra os índices de vegetação processados, que deram origem aos valores de media, máximos e mínimos para os oito talhões avaliados. Nas análises de regressão linear, através dos gráficos de correlação por regressão linear da produtividade em campo (ton/ha) e os valores dos médios dos índices de vegetação (NDVI, EVI, ARVI e RENDVI (Figura 3), foi possível efetivar as relações de correlação entre os valores médios dos índices de vegetação NDVI, EVI, ARVI e RENDVI dos oito talhões de palma de óleo e as respectivas produtividades em campo para o ano de 2014. Foram obtidos os valores de coeficientes de determinação  $R^2$  0,65 e 0,61, para o EVI e NDVI, respectivamente, onde os mesmos foram as variáveis independentes que melhor se

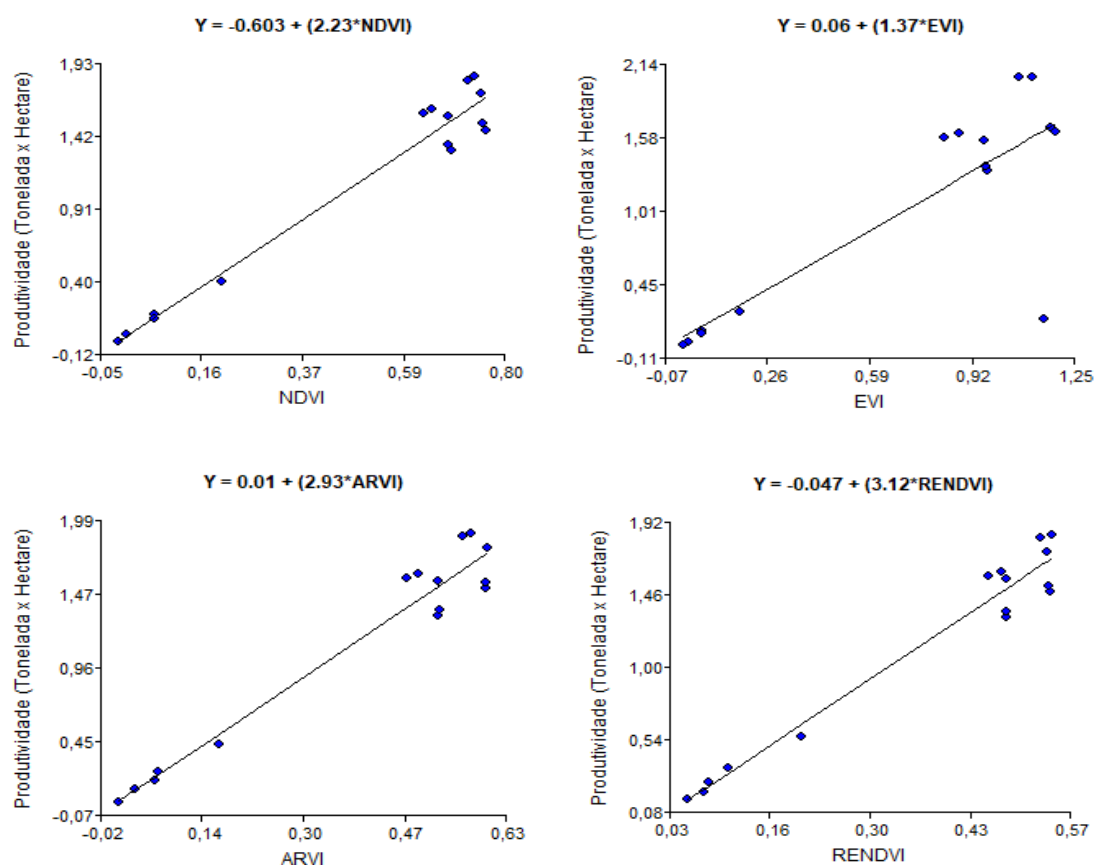
correlacionam com a produtividade observada da área de estudo (variável dependente), indicando que o modelo consegue estimar a produtividade (Figura 3). De outra forma, o RENDVI apresentou o mais baixo coeficiente de determinação, sendo possível constatar que, mesmo apresentando alguma sensibilidade às variações espectrais da vegetação, o mesmo se correlacionou com a produtividade, porém com menor poder precisão, que os observados pelo EVI e NDVI.



**Figura 2:** Índices de vegetação NDVI (a), EVI (b), ARVI (c) e RENDVI (d) dos oito talhões de palma de óleo da área de estudo, no ano de 2014.

A eficiência do EVI, que melhor explicou a produtividade dos talhões, se deu possivelmente por ser um índice que leva em consideração as bandas do visível (red e blue), tornando o modelo mais sensível a eficiência fotossintética da palmeira e bandas espectrais do infravermelho próximo, expressando a integridade estrutural das folhas de palma, além de minimizar o ruído da influência do background e da atmosfera. O EVI e

o NDVI possibilitaram o melhor realce espectral dos talhões com biomassa mais ativa e densa.



**Figura 3:** Gráficos de correlação por regressão linear da produtividade em campo (ton/ha) e os valores dos médios dos índices de vegetação NDVI (a), EVI (b), ARVI (c) e RENDVI (d) dos oito talhões de palma de óleo no ano de 2014.

O EVI apresentou os valores máximos mais expressivos em todos os talhões, diferenciando-se do NDVI, que por sua vez, mesmo apresentando boa correlação com a produtividade, evidenciou baixos valores máximos nos talhões, possivelmente pela sua alta susceptibilidade ao background. Por sua vez, os índices ARVI e RENDVI apresentaram as mais baixas correlações entre as médias dos índices dos talhões e a produtividade em campo. Dentre os índices de mais “baixa eficiência” aquele que apresentou menor coeficiente de determinação para a palma de óleo para a média dos talhões de estudo foi o RENDVI.

Além disso, o RENDVI apresentou os seus valores máximos menos pronunciados entre os quatro índices avaliados. Outra evidencia preliminar, refere-se ao fato deste índice utilizar uma faixa estreita, a banda red-edge, possibilitando a redução da influência

dos pigmentos folheares, restringindo os registros das variações das atividades fotossintéticas nos talhões, fato que dificultou a melhor inferência da produtividade.

Em resumo, se constata que os índices EVI e NDVI apresentaram forte potencial para estimar a produtividade da palma de óleo na área de estudo. Além disso, vale ressaltar que os resíduos foram considerados normais, pelos testes de uniformidade dos resíduos (Shapiro- Wilk e Kolmogorov-Smirnov) ao nível de 1% de significância.

A partir dos cálculos de produtividade pelas equações da Tabela 2, baseados nos índices de vegetação e na colheita do ano de 2014, foram geradas as estimativas de produtividade para os índices NDVI, EVI, ARVI e RENDVI, que são apresentadas na Tabela 3. A análise comparativa das produtividades demonstra que os índices NDVI, EVI e ARVI evidenciam correlações significativa com a Produtividade real. Entretanto RENDVI difere da tendência positiva.

**Tabela 2:** Regressão - Produtividade da Palma de Óleo (Y) nos índices de vegetação – Media dos Talhões. Os índices NDVI, EVI, ARVI e RENDVI apresentam correlação significativa com a Produtividade.

Talhão	Idade (anos)	Índice	R <sup>2</sup>	ρ	Equação de Regressão (produtividade)
B08 B09 B10 C07 C08 C10 C11 C12	3 a 6	NDVI	0,61	-0,73	Y= -0,603+(2,23*NDVI)
		EVI	0,65	-0,79	Y= 0,06+(1,37*EVI)
		ARVI	0,40	-0,66	Y= 0,01+(2,93*ARVI)
		RENDVI	0,12	-0,43	Y= -0,047+(3,12*RENDVI)

Na Tabela 3 optou-se por apresentar a comparação dos valores da predição da produtividade observada em campo e as médias obtidas pelos índices de vegetação para cada Talhão. Desta forma, verifica-se que todos os índices de vegetação apresentaram produtividade estimada bastante próximas aos valores de campo para os talhões estudados. Destaque para o EVI que apresentou a menor diferença na produtividade estimada em relação a produtividade observada na colheita.

Ao analisarmos individualmente os talhões versus índices, observa-se que os talhões B08, B09 e C11 possuem maior aproximação da sua produtividade real com o NDVI e EVI. No geral a produtividade RENDVI apresentou maiores distanciamento da produtividade medida em campo para todos os talhões. Esperava-se melhor rendimento da banda red-edge através do RENDVI, este por sua vez superestimou as estimativas. O

fato de ser um índice bastante sensível ao estresse hídrico e fisiológico no cultivo, em um ano normal de produtividade, como foi em 2014, pode ter potencializado seus resultados, levando a erros ou uma menor correlação pretendida.

A aferição realizada pelo cálculo do indicador estatístico RMSE entre a produtividade estimada e a observada em campo, para o melhor resultado encontrado (EVI), determinou o valor de 20,89% para os oitos talhões estudados, indicando que o método apresenta bom ajuste, confirmado pelos outros indicadores adotados neste experimento que consideraram os ajustes satisfatório para estimar a produtividade.

**Tabela 3:** Correlação (r) entre produtividade observada em campo e produtividade estimada através dos diferentes índices de vegetação, no ano de 2014.

Produtividade campo x Estimativas Índices de Vegetação (ton/ha)					
Talhão	Rendimento Campo	NDVI	EVI	ARVI	RENDVI
B08	2,40	2,382	2,400	2,287	2,100
B09	1,92	1,916	1,960	1,882	1,675
B10	2,28	1,743	1,747	1,759	1,803
C07	1,58	1,555	1,592	1,482	1,600
C08	1,61	1,573	1,562	1,568	1,646
C10	1,32	1,600	1,593	1,611	1,747
C11	1,56	1,553	1,498	1,646	1,655
C12	1,36	1,569	1,536	1,641	1,679

#### 4. CONCLUSÕES

Vale ressaltar que existem pouquíssimos estudos de modelagem de produtividade por sensoriamento remoto na cultura da palma de óleo na Amazônia brasileira. Ou seja, a presente técnica ainda não foi incorporada ao manejo produtivo na região. Desta forma, os resultados preliminares obtidos com o presente experimento já permitem a adoção sistemática da estimativa da produtividade da palma de óleo, através de imagens orbitais; e em um futuro próximo uso de drones para se atingir uma alta precisão espacial e espectral.

Os índices de vegetação se mostram cada vez mais versáteis não somente na estimativa de produtividade, mas também em outras rotinas de interesse do manejo agrícola, como no monitoramento de pragas e doenças. O suporte estatístico através da técnica de regressão linear encontra fundamento inquestionável em outras lavouras e culturas e, neste estudo se mostrou amplamente viável. Os Índices de vegetação que



apresentaram resultados mais satisfatórios foram o EVI e o NDVI. Vale ressaltar, entretanto, que clássico NDVI pode cumprir a função com ótima precisão, podendo estes serem rotineiramente utilizados como estimadores na cultura da palma de óleo.

Ressalta-se ainda, que para qualquer modelagem utilizada na estimativa da produtividade, faz-se importante o maior número possível de imagens analisadas, preferencialmente com disponibilidade que melhor se ajuste aos ciclos produtivos da cultura de palma de óleo, que possui produção perene. Isto se faz necessário, pois de busca produzir correlações contínuas e sincronizadas com a dinâmica produtiva, sazonalidade e ocorrência de eventos fortuitos como infestação de pragas e doenças, estiagens severas, dentre outros fatores adversos. Assim recomenda-se análises mais detalhada a fim de fornecer dados mais acurados, onde a empresa agrícola possa mapear suas áreas com precisão e custo viável, em relação ao modo tradicional.

## REFERÊNCIAS

- BERTOLIN, N. de O. **Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite.** Viçosa-MG, 2016.
- BORATTO, I. M. DE P.; GOMIDE, R. L. **Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu. Anais.. INPE. 2013.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Palmas para o Dendê.** Revista Agroenergia. nº 2, Brasília, 2011. Acesso em: 27 dez. 2017.
- EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro, 306p. 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos.** 5. ed., rev. e ampliada. Brasília, DF. 356 p. 2018.
- HUETE, A; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEWEEN, W. A. **Comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS.** Remote Sensing of Environment, n. 59, p. 440-451, 1997.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos.** São Paulo: Fundação Editora da Unesp, 1998.
- LEVERMANN, R. A., SOUZA, J. P. M. **Óleo de palma: o crescimento da indústria global.** Agroanalysis, v. 34, n. 08, p. 25-26. 2014.
- MONTGOMERY, D. C., VINING, G. C., PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis.** New York: J. Wiley, 3. ed. 2001.
- PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação.** 1. ed. São José dos Campos: Parêntese. 135 p. 2007.
- PONZONI, F.J., SHIMABUKURO, Y.E., KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, p.176. 2012.
- RAMOS, M. C. A. **Estimativa de Produtividade de cana-de-açúcar por meio de imagens do satélite Landsat-5/ TM em áreas de pivôs centrais na região de Jaíba - MG.** 2013. 59 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2013.
- RODRIGUES, T. E., SILVA, J. M. L. da, SILVA, B. N. R, da., VALENTE, M. A., GAMA, J.R.N.F.; SANTOS, E.S. dos; ROLLIM, P. A. M.; PONTE, F. C. da. **Caracterização e classificação dos solos do município de Tailândia, estado do Pará.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 55 p. 2005.
- VARELLA, C. A. A; MEDEIROS, R.; GLERIANI, J. M. **Agricultura de Precisão e Sensoriamento Remoto.** In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: 58 tecnologias e perspectivas. 2ed. revisada e ampliada. Viçosa, MG: Os editores, Cap. 9, p. 258. 2011.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente abordagem da Tese buscou um foco de pesquisa a ser ampliado no âmbito do Programa de Pós-graduação em Agronomia e da UFRA, com novos estudos que utilizem a ampla base de dados agronômicos disponível na região, com apoio de metodologias e tecnologias, acessíveis institucionalmente. Os estudos aqui apresentados foram publicados separadamente, em periódicos científicos de relevância, na perspectiva de avançar em abordagens com aplicação de geotecnologias na agricultura, ampliando significativamente a aplicação de métodos de precisão no manejo da palma de óleo e outras culturas na região. Os estudos enfatizaram o potencial do sensoriamento remoto e do processamento de imagens na percepção espectral dos sensores sobre o comportamento biofísico da cultura.

A identificação de anomalias poderá se tornar uma rotina operacional no manejo, como indicador da presença de doenças, sendo possível a reprodutibilidade do método para outras áreas de palma de óleo, com plantas de idades e material genético variados. Vale ressaltar que a detecção de doenças por sensoriamento remoto e medidas de produtividade devem ser complementares a outros métodos, podendo evoluir para modelagens complexas e mais eficientes.

Os métodos baseados em índices de vegetação, parecem possuir melhor eficiência quando aplicados a plantios maduros, com dossel contínuo, onde as influências do solo na resposta espectral de interesse não sejam prejudiciais, principalmente para utilização de imagens de média a baixa resolução. Neste contexto, recomenda-se uma ampla avaliação dos índices de vegetação com foco na resposta biofísica, considerando as características locais: albedo, fisiologia e morfologia da palma de óleo, dentre outras.

Os métodos de estimativa da produtividade por índices de vegetação na palma de óleo devem ser estendidos para multi-datas e ciclos anuais de produção. Adicionalmente, faz-se importante aumento na quantidade de amostras (talhões de palma de óleo), melhorando a relevância estatística para o cálculo de produtividade. Enfatiza-se que a abordagem estatística no método é uma ferramenta poderosa para validação e estimações necessária, dando significado para as medições obtidas pelos sensores remotos.

Por fim, pode-se vislumbrar em curto prazo um avanço significativo no conhecimento do comportamento espectral da palma de óleo e suas variedades,

abordando além das enfermidades, problemas relacionados a déficits hídricos e deficiência nutricionais. Desta forma, faz-se importante o mapeamento espectral detalhado da cultura, estabelecendo uma “biblioteca” de assinaturas/curvas, que auxilie no reconhecimento de padrões que possam dar suporte ao monitoramento preciso.