



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.05.12.40-TDI

## **ANÁLISE ESPECTRO-TEMPORAL DAS CULTURAS DE MILHO, SOJA E CANA-DE-AÇÚCAR COM DADOS DO SENSOR OLI/LANDSAT-8**

Bruno Montibeller

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelos Drs. Ieda Del'Arco Sanches,  
e Alfredo José Barreto Luiz,  
aprovada em 27 de abril de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QRM6DS>>

INPE  
São José dos Campos  
2018

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

**Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.05.12.40-TDI

## **ANÁLISE ESPECTRO-TEMPORAL DAS CULTURAS DE MILHO, SOJA E CANA-DE-AÇÚCAR COM DADOS DO SENSOR OLI/LANDSAT-8**

Bruno Montibeller

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelos Drs. Ieda Del'Arco Sanches,  
e Alfredo José Barreto Luiz,  
aprovada em 27 de abril de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QRM6DS>>

INPE  
São José dos Campos  
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Montibeller, Bruno.

M766a Análise espectro-temporal das culturas de milho, soja e cana-de-açúcar com dados do sensor OLI/LANDSAT-8 / Bruno Montibeller. – São José dos Campos : INPE, 2018.  
xxii + 94 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.05.12.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Ieda Del'Arco Sanches, e Alfredo José Barreto Luiz.

1. Espectro-temporal. 2. Análise interespecífica. 3. Soja. 4. Milho. 5. Cana-de-açúcar. I.Título.

CDU 528.854:633.1

---



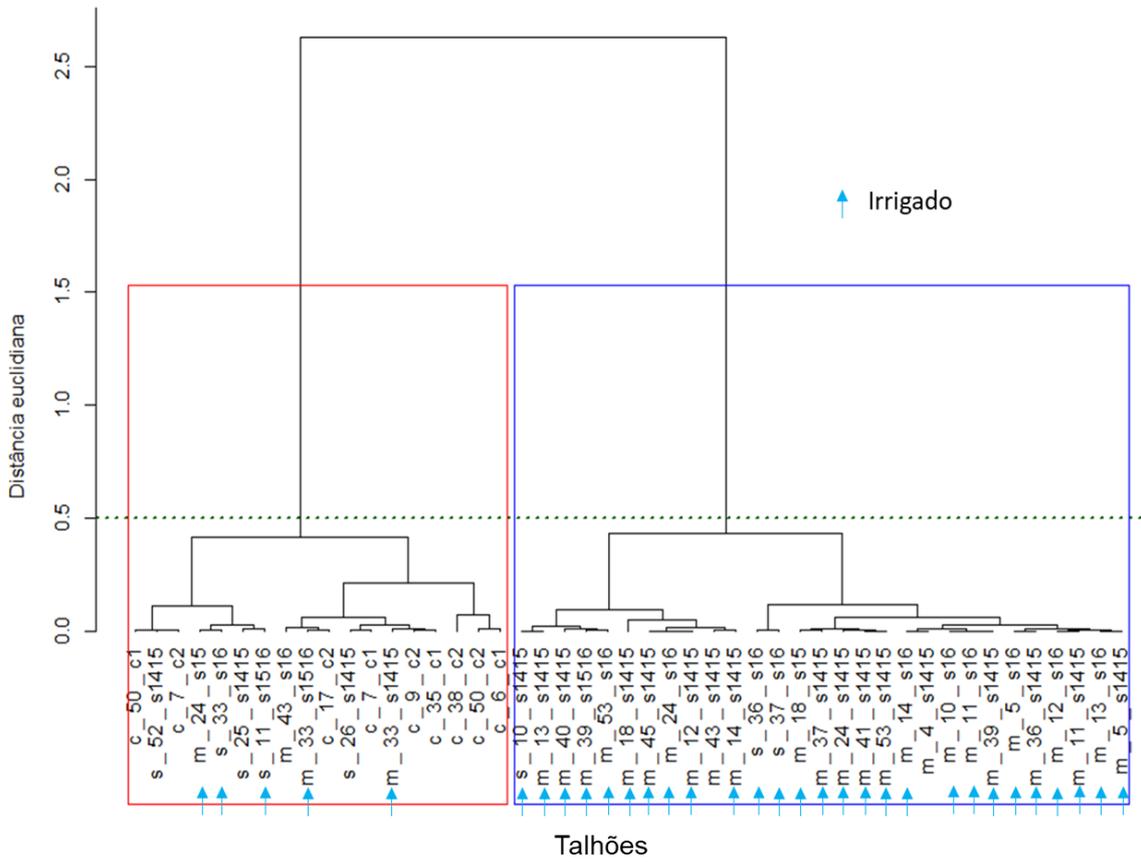
Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

# ERRATA

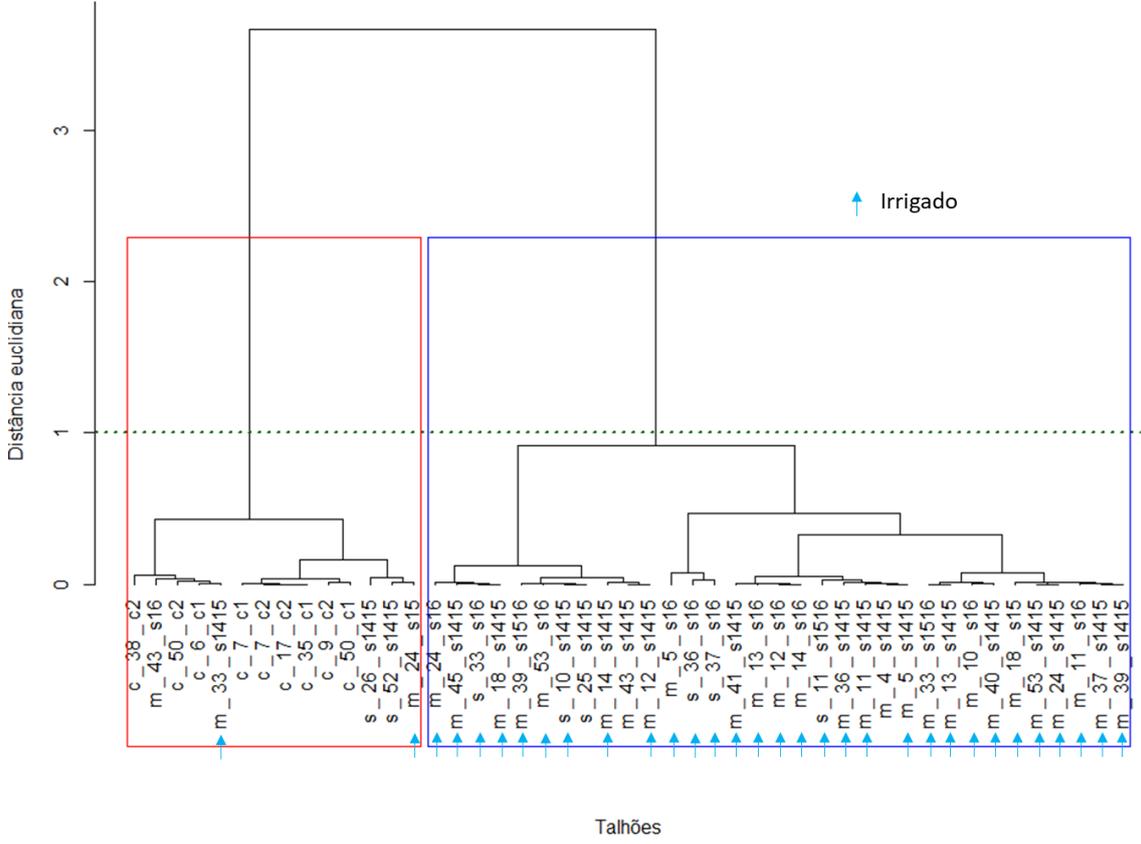
Página 70 – Figura 5.17

Onde se lê



Leia-se

Interespecífico - E2 - EVI



Aluno (a): **Bruno Montibeller**

Título: "ANÁLISE ESPECTRO-TEMPORAL DAS CULTURAS DE MILHO, SOJA E CANA-DE-AÇÚCAR COM DADOS DO SENSOR OLI/LANDSAT-8".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em

**Sensoriamento Remoto**

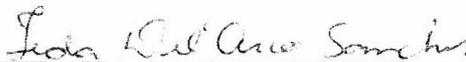
Dr. Camilo Daleles Rennó



Presidente / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Dra. Ieda Del' Arco Sanches



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Alfredo José Barreto Luiz



Orientador(a) / EMBRAPA / Jaguariúna - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Daniel Alves de Aguiar



Convidado(a) / Agrosatélite / Florianópolis - SC

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 27 de abril de 2018



*“A persistência é uma virtude que ilumina os labirintos da mente”.*

*Autor desconhecido*



## AGRADECIMENTOS

A Prof. Dra. Ieda Del'Arco Sanches, pela exímia orientação, pela amizade, pela confiança, pelas oportunidades, pelo incentivo e pelos conhecimentos repassados.

Ao Dr. Alfredo José Barreto Luiz, pela orientação, pelas ideias e contribuições.

Ao Dr. Camilo Daleles Rennó pela disponibilidade em me atender, propondo ideias e sanando dúvidas.

Aos professores, aos colaboradores e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em especial à Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR, por ter permitido a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Fábio Gonçalves e Daniel Aguiar, pelo estímulo, pelo apoio, pelo suporte e pelas inúmeras contribuições oferecidas ao longo desta pesquisa.

Aos meus amigos de república (Erone dos Santos e Alindomar Lacerda) que dividiram os anseios, as dificuldades e os momentos de alegria.

Aos meus amigos do curso, pela ajuda, pelo auxílio, e pela troca de experiências ao longo dessa jornada.

À minha família.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro.

A todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.



## RESUMO

A agricultura, além de provedora de alimentos e energia, é uma das atividades econômicas de maior destaque nas exportações brasileiras. Produtos derivados da soja, do milho e da cana-de-açúcar são alguns exemplos de mercadorias agrícolas exportadas. Assim, informações relacionadas à área plantada e à produção destas culturas são essenciais, uma vez que isso afeta a cotação destes produtos. A adoção de dados de sensoriamento remoto para pesquisas em áreas agrícolas se apresenta como uma alternativa viável e complementar aos métodos atuais de levantamento, fornecendo informações atualizadas e de forma contínua. Essas pesquisas, geralmente, utilizam a informação espectral como principal variável para diversos objetivos como, mapeamento, estimativa de produtividade, cálculo de biomassa, etc. Entretanto, as diferentes práticas de manejo (com ou sem irrigação, época de plantio, etc.) empregadas no processo de produção, podem alterar as características espectrais das culturais. Neste sentido, o presente trabalho tem como hipótese que a variação espectral intraespecífica do milho, da soja e da cana-de-açúcar a partir de dados espectrais multitemporais do sensor OLI, é menor que a variação interespecífica, independentemente das práticas de manejo adotadas ao longo do seu desenvolvimento. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar o perfil espectro-temporal das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar, cultivadas em uma área da Mesorregião de Campinas, SP, em dois anos agrícolas completos (2014/2015 e 2015/2016), a partir de imagens do sensor OLI/Landsat-8, e verificar as diferenças espectro-temporal das culturas. Séries temporais de imagens OLI foram utilizadas para adquirir o perfil espectro-temporal das três espécies cultivadas em épocas distintas (safra e safrinha) e sob diferentes práticas de manejos (irrigado e não irrigado). Foram utilizadas seis bandas espectrais (B2-B7) do sensor OLI e dois índices de vegetação (NDVI e EVI), os quais foram calculados a partir do valor de reflectância das bandas. Com base na informação espectro-temporal (bandas e índices de vegetação), uma análise hierárquica de agrupamento foi realizada. A partir dos resultados, foi possível identificar que as bandas espectrais (B2-B7) se mostraram mais eficientes quando comparadas com os índices de vegetação, para a divisão e geração de *clusters* de cada cultura, permitindo assim, analisar a influência das práticas culturais. Além disso, um conjunto de bandas espectrais, formado pelas três bandas (B5-B6-B4), comumente utilizadas para interpretação visual de alvos agrícolas, geraram o mesmo resultado da análise baseada nas seis bandas. Com os resultados, é possível inferir que a variação espectro-temporal intraespecífica é menor que a variação espectro-temporal interespecífica, independentemente das práticas de manejo empregadas.

Palavras-chave: análise interespecífica, análise intraespecífica, dinâmica agrícola, análise de agrupamentos, índices de vegetação.



# **SPECTRUM-TEMPORAL ANALYSIS OF THE CROPS OF CORN, SOY AND SUGAR CANE BASED ON OLI / LANDSAT-8 SENSOR DATA**

## **ABSTRACT**

Agriculture, besides providing food and energy, is one of the most prominent economic activities in Brazilian exports. Products derived from soy, corn and sugar cane are some examples of exported agricultural commodities. Thus, information related to the acreage and the production of these crops are essential, since this affects the price of these products. The adoption of remote sensing data for research in agricultural areas is a viable and complementary alternative to current surveying methods, providing updated and continuous information. These surveys generally use spectral information as the main variable for several purposes such as mapping, forecast yield, biomass estimation, etc. However, different management practices (with or without irrigation, planting time, etc.) employed in the production process can alter the spectral characteristics of the crop. In this sense, the present work has as hypothesis that the intraspecific spectral variation of corn, soybean and sugarcane from multitemporal OLI sensor spectral data, is smaller than the interspecific variation, independently of the management practices adopted during crop's development. Thus, the objective of this work was to analyze the spectrum-temporal profile of soybean, maize and sugarcane crops grown in an area of the mesoregion of Campinas, SP, in two full agricultural years (2014/2015 and 2015/2016), from OLI/Landsat-8 sensor images, and to verify the spectral-temporal differences of the cultures. Time series of OLI images were used to acquire the spectrum-temporal profile of the three species cultivated at different times (spring-summer and summer-fall) and under different management (irrigated and non-irrigated). Six spectral bands (B2-B7) of the OLI sensor and two vegetation indices (NDVI and EVI) were used, which were calculated from the reflectance value of the bands. Based on the spectral-temporal information (bands and vegetation indices), a hierarchical cluster analysis was performed. From the results, it was possible to identify that the spectral bands (B2-B7) were more efficient when compared with the vegetation indexes, for the division and generation of clusters of each culture, thus, to analyze the influence of cultural practices. In addition, a set of spectral bands, formed by the three bands (B5-B6-B4) commonly used for visual interpretation of agricultural targets, generated the same result of the analysis based on the six bands. With the results, it is possible to infer that the intraspecific spectrum-temporal variation is smaller than the interspecific spectral-temporal variation, independently of the management practices employed.

Keywords: interspecific analysis, intraspecific analysis, agricultural dynamics, cluster analysis, vegetation indices



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fases de desenvolvimento da soja. i) fase inicial; ii) fase de crescimento vegetativo; e iii) fase de senescência. ....	8
Figura 2.2. Valores de reflectância nas diferentes faixas espectrais de acordo com o aumento do IAF. ....	10
Figura 2.3. Distribuição angular das folhas. ....	11
Figura 2.4. Ciclo de desenvolvimento de culturas semiperenes e culturas anuais. ....	14
Figura 2.5. Variação dos valores de NDVI de acordo com o desenvolvimento da soja e métricas da curva de NDVI; a) valor mínimo, b) valor máximo, c) amplitude, d) duração do ciclo. ....	15
Figura 3.1. Mapa de localização da área de estudos. Imagem OLI/Landsat-8. Composição falsa-cor R5G6B4. ....	26
Figura 4.1. Fluxograma das etapas metodológicas efetuados na presente pesquisa. ....	27
Figura 4.2. Exemplificação da série temporal de imagens OLI/Landsat-8 durante o ciclo de desenvolvimento do milho, soja e cana. Composição falsa-cor R5G6B4. ....	35
Figura 4.3. Exemplo de série temporal de NDVI do sensor MODIS sem e com filtro. Os círculos amarelos representam as datas estimadas de plantio. ....	38
Figura 4.4. Extração dos valores de reflectância da banda 5 da imagem OLI de 27/04/2016. Os pixels destacados pelo quadrado branco são exemplos de valores que não foram extraídos devido à restrição de 80%. A seta indica um pixel com o valor da mediana. ....	39
Figura 4.5. Exemplo de todos os valores de reflectância referentes à banda 5 da imagem OLI de 27/04/2016. A linha vertical preta indica o valor de mediana calculado e as linhas vermelhas localizadas à direita e a esquerda são os 50 valores mais próximos à mediana. ....	40
Figura 4.6. Estádios de desenvolvimento da soja com os respectivos intervalos de dias. ....	44

Figura 4.7. Exemplo de um gráfico de sequências de agrupamento. O platô vertical destacado pelo elipsoide em vermelho ilustra o limiar que pode ser utilizado como limiar de similaridade.....	47
Figura 5.1. Perfil espectro-temporal, por banda e por IV, dos 30 talhões de milho.....	49
Figura 5.2. Perfil espectro-temporal, por banda e por IV, de oito talhões de soja.....	50
Figura 5.3. Perfil espectro-temporal, por banda e por IV, de nove talhões de cana-de-açúcar.....	51
Figura 5.4. Perfil temporal das bandas B4, B5 e B6 do OLI, e NDVI para um talhão cultivado com soja (Id 33) durante a safra de 2016. As linhas verticais laranjas indicam a divisão dos estádios de desenvolvimento (E1, E2 e E3).....	58
Figura 5.5. Sequência de agrupamentos de acordo com a distância euclidiana nas seis dimensões (bandas) analisadas. O platô vertical é indicado pela elipse amarela.....	54
Figura 5.6. Dendrograma da análise interespecífica com todos os talhões de soja, milho e cana-de-açúcar, com base em seis bandas OLI (B2 a B7).....	56
Figura 5.7. Distribuição da média e os respectivos desvios padrão dos valores médios do estágio E2 de cada talhão e de cada banda.....	58
Figura 5.8. Perfil espectro-temporal das bandas e dos índices dos talhões de soja Id 10, Id 52 e Id 25, cultivados na safra 14/15. Os limiares adotados (linhas horizontais azuis claras) de 0.4 e 0.8 foram estabelecidos com base nos perfis espectro-temporais. A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2.....	59
Figura 5.9. Talhão de soja cultivado durante a safra 2014/15 (s_52_s1415) e que foi agrupado na classe que predomina talhões cultivados com cana-de-açúcar (cluster de cana).....	60
Figura 5.10. Perfil espectro-temporal do talhão de milho Id 33 cultivado durante a safra 2014/15. Os limiares adotados (linhas horizontais azuis claras) de 0.4 e 0.8 foram estabelecidos com base nos perfis espectro-temporais. A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2. ....	61

Figura 5.11. Perfil espectro-temporal do talhão de milho (Id 43) cultivado durante a safra 2014/15 e safrinha 2016, e do talhão de cana (Id 38) cultivado durante seu segundo ciclo (c2). A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2. ....	62
Figura 5.12. Perfil espectro-temporal do talhão de milho (Id 24) cultivado durante a safrinha 2015 e safrinha 2016, e do talhão de cana (Id 7) cultivado durante seu segundo ciclo (c2). A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2. ....	64
Figura 5.13. Variação dos valores médios do E2 de todas as bandas e de todos os talhões para as três culturas analisadas. O traço preto contido nas caixas representa o valor da mediana de cada banda. ....	65
Figura 5.14. Correlação das bandas espectrais de cada cultura com base no valor médio do E2 de cada talhão. ....	66
Figura 5.15. Dendrograma da análise interespecífica com todos os talhões apenas com as bandas Red (B4), NIR(B5) e SWIR (B6). ....	68
Figura 5.16. Dendrograma da análise interespecífica baseada nos valores de NDVI, com todos os talhões. ....	69
Figura 5.17. Dendrograma da análise interespecífica baseada nos valores de EVI, com todos os talhões. ....	70
Figura 5.18. Variação dos valores médios do E2 dos IV de todos os talhões para as três culturas analisadas. O traço preto contido nas caixas representa o valor da mediana de cada IV. ....	71
Figura 5.19. Dendrograma da análise intraespecífica de talhões de milho baseada em todas as bandas. ....	72
Figura 5.20. Dendrograma da análise intraespecífica de talhões de soja baseada em todas as bandas. ....	73
Figura 5.21. Dendrograma da análise intraespecífica de talhões de cana baseada em todas as bandas. ....	74



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Bandas espectrais, resolução espacial e faixas espectrais do sensor OLI/Landsat-8. ....	22
Tabela 4.1. Descrição das principais características dos talhões analisados. Imagem OLI/Landsat-8 na composição falsa-cor R5G6B4.....	30
Tabela 4.2. Datas das imagens OLI/Landsat-8 referentes às órbitas/pontos 2019/75 e 220/75. ....	33
Tabela 4.3. Número de imagens livres ou parcialmente livres de nuvens por talhão e por safra. As siglas c1 e c2 se referem ao primeiro e segundo ciclo dos talhões de cana, respectivamente. ....	36
Tabela 4.4. Número de dias que compreende cada estágio da soja, milho e cana. Estádio 1 (E1), estágio 2 (E2) e estágio 3 (E3).....	43



## LISTA DE ABREVIATURAS

AHA	Análise hierárquica de agrupamento
BRDF	<i>Bidirectional reflectance distribution function</i>
CDL	<i>Cropland Data Layer</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DA	Dia artificial
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
EVI2	<i>Enhanced Vegetation Index 2</i>
GEO	<i>Group on Earth Observations</i>
GEOGLAM	<i>GEO Global Agricultural Monitoring</i>
HRV	<i>High Resolution Visible</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IV	Índice de vegetação
LDCM	<i>Landsat Data Continuity Mission</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i>
NASS	<i>National Agricultural Statistics Service</i>
ND	Número Digital
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
REM	Radiação eletromagnética
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
SR	Sensoriamento remoto
STRS	<i>Spectral-Temporal Response Surface</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Hipótese de Estudo .....	4
1.2. Objetivos .....	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
2.1. Sensoriamento remoto agrícola .....	5
2.1.1. Análise espectral .....	6
2.1.2. Análise multitemporal .....	13
2.1.3. Análise espectro – temporal .....	16
2.2. Estádios de desenvolvimento fenológico do milho, soja e cana-de-açúcar .....	19
2.2.1. Fenologia da soja ( <i>Glycine max</i> ).....	19
2.2.2. Fenologia do milho ( <i>Zea mays</i> ) .....	20
2.2.3. Fenologia da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> ).....	20
2.3. <i>Moderate resolution imaging spectroradiometer</i> – MODIS.....	21
2.4. <i>Operational land imager</i> - OLI/Landsat-8 .....	21
2.5. Análise de agrupamento .....	23
3. ÁREA DE ESTUDO .....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
4.1 Dados de campo .....	28
4.2 Imagens do sensor OLI/Landsat-8.....	33
4.3 Série temporal de NDVI - MODIS/Terra.....	37
4.4 Extração dos valores de reflectância .....	39
4.5 Geração dos gráficos do perfil espectro-temporal por banda e dos índices de vegetação .....	41
4.6 Definição dos estádios de desenvolvimento de cada cultura .....	42
4.7 Análise hierárquica de agrupamento .....	45
4.8 Definição do limiar de similaridade .....	46
5. RESULTADOS .....	48
5.1 Perfis espectro-temporais .....	48
5.2 Análise interespecífica.....	53
5.2.1 Análise baseada em 6 bandas espectrais.....	54
5.2.2 Análise baseada nas bandas espectrais do <i>Red</i> (B4), <i>NIR</i> (B5) e <i>SWIR</i> (B6)	

5.2.3	Análise baseada no NDVI e EVI .....	68
5.3	Análise intraespecífica.....	71
6.	DISCUSSÃO.....	75
7.	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
	APÊNDICE A.....	89

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade agrícola, além do importante papel como fonte de alimentos e energia, possui significativa participação nas exportações brasileiras. Culturas como a soja, o milho e a cana-de-açúcar são exemplos de produtos agrícolas brasileiros exportados. De acordo com o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), em 2016 o Brasil exportou aproximadamente 112,8 Mt de produtos derivados dessas culturas.

A soja e o milho são as commodities predominantes nas diversas regiões produtoras do país, sendo plantadas entre o final da primavera e início do verão (primeira safra) e/ou entre o final do verão e início do outono (segunda safra, também denominada de safrinha). Conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), na safra 2015/2016, essas duas culturas ocuparam 33,2 e 15,9 milhões de hectares, respectivamente, sendo a soja majoritariamente cultivada durante a safra e o milho durante a safrinha (10,5 milhões de hectares). Em relação às divisas geradas em 2016, a exportação de soja e de seus derivados gerou U\$ 25,4 bilhões e o milho U\$ 4,2 bilhões (AGROSTAT, 2016).

A cana-de-açúcar é outra cultura com expressiva importância econômica, sendo que o Brasil é o maior produtor mundial. Na safra 2015/2016, a cana ocupou cerca de 7,6 milhões de hectares na região centro-sul do país (CONAB, 2016), sendo a produção destinada à fabricação de açúcar, etanol e eletricidade. Esse último foi o maior responsável pela expansão das áreas cultivadas com cana a partir de 2003 (RUDORFF et al., 2010).

As estimativas de área das culturas, geralmente são obtidas de forma subjetiva pelos órgãos oficiais como a CONAB e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os métodos subjetivos, apesar de apresentarem inúmeras vantagens, não permitem avaliar os erros intrínsecos à estimativa. Em consonância com a importância do setor agrícola para a economia e com a possibilidade de

crescimento do setor, é imprescindível o desenvolvimento de metodologias objetivas para a obtenção de informações acerca da área de plantio, da produção e da produtividade das principais culturas agrícolas, com o intuito de complementar as estatísticas oficiais e auxiliar na compreensão e planejamento do uso sustentável do território (MORTON et al., 2005; MÜLLER et al., 2015).

A adoção de dados de sensoriamento remoto (SR) para a obtenção de informação sobre a produção agrícola (e.g., estimativa de área, mapeamento de culturas e monitoramento agrícola) tem se destacado como uma alternativa válida, especialmente devido ao seu caráter sinóptico e contínuo, permitindo sua aplicação em diferentes projetos de monitoramento dos recursos naturais e possibilitando o cálculo do erro associado ao processo de monitoramento (MELLO et al., 2010).

Devido à dinâmica temporal das áreas agrícolas, um pressuposto para o uso de dados de SR para o estudo destas áreas é a utilização de várias imagens ao longo da safra. Diversas metodologias adotaram a abordagem multitemporal, utilizando séries de imagens que, geralmente, compreendem o período de desenvolvimento de determinada cultura (KASTENS et. al., 2017). Essas metodologias utilizam os mais diversos tipos de classificadores de imagens (supervisionados, não supervisionados, classificação visual, etc.).

Dados de sensores de moderada resolução espacial (e.g., 250 m) e alta resolução temporal (1-2 dias), como o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), têm sido amplamente utilizados em análises de áreas agrícolas. Contudo, dados com essas características não podem ser empregados em grande parte das áreas agrícolas brasileiras, devido à dimensão e/ou formato dos talhões agrícolas a serem monitorados. Dados como os dos sensores a bordo dos satélites do programa Landsat, possuem resolução espacial mais adequada (30 m), mas têm baixa resolução temporal (16 dias), aspecto inadequado para análise das áreas agrícolas brasileira que possuem elevado dinamismo (Victoria et al., 2012). Além disso, um grande desafio de se utilizar dados de sensores de baixa resolução

temporal para o monitoramento da atividade agrícola é a alta incidência de cobertura de nuvens em algumas regiões do território brasileiro, principalmente durante o período de safra (WHITCRAFT et al., 2015a; EBERHARDT et al., 2016). O desenvolvimento de constelações de satélites transportando sensores de média resolução espacial, como o *Multi-Spectral Instrument* (MSI) dos satélites Sentinel 2, a continuidade do programa Landsat com o lançamento do Landsat-9 planejado para 2023 e a abordagem multissensor (combina dados provenientes de diferentes sensores) se apresentam como alternativas para aquisição de dados com resolução espacial e temporal adequadas para o acompanhamento de áreas agrícolas.

Independentemente dos dados ou sensores utilizados, a informação espectral é a base de diversas metodologias para a obtenção de informações sobre as culturas agrícolas utilizando dados de SR. Entretanto, esta informação é complexa, visto que as diversas formas de manejo (e.g., área irrigada, prática de duas safras, época do ano e plantio direto) podem resultar em valores de reflectância diferentes para uma mesma cultura. E, além disso, a estrutura do dossel, quantidade de folhas (índice de área foliar) e fase fenológica das plantas também influenciam no comportamento espectral da vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

A avaliação do comportamento espectral de culturas agrícolas, cultivadas em períodos e sistemas de manejos diferentes, é fundamental para identificar as causas das similaridades ou diferenças espectrais intraespecíficas (mesma cultura) ou interespecíficas (diferentes culturas, como milho-cana ou milho-soja). Essas similaridades ou diferenças podem, quando bem compreendidas, promover uma melhor utilização da informação espectral nas mais diversas análises, como mapeamento, estimativas de produtividade, concentração de clorofila, entre outros. Nesse sentido, se faz necessário o melhor entendimento do comportamento espectral das culturas, ao longo do seu desenvolvimento, com base em imagens de média resolução espacial (~30m).

## **1.1. Hipótese de Estudo**

O presente trabalho tem como hipótese que a variação espectral intraespecífica do milho, da soja e da cana-de-açúcar a partir de dados espectrais multitemporais do sensor OLI, é menor que a variação interespecífica, independentemente das práticas de manejo adotadas ao longo do seu desenvolvimento.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o perfil espectro-temporal das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar, cultivadas em uma área da Mesorregião de Campinas, SP, em dois anos agrícolas completos (2014/2015 e 2015/20146), a partir de imagens do sensor OLI/Landsat-8.

Os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Obter o perfil espectro-temporal, via reflectância de superfície, das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar da área de estudo com base em dados do OLI/Landsat-8.
- Analisar o perfil espectro-temporal interespecífico das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar da área de estudo, a partir de bandas espectrais do OLI e índices de vegetação.
- Analisar o perfil espectro-temporal intraespecífico das três culturas de soja, milho e cana-de-açúcar da área de estudo, com base em seis bandas espectrais do sensor OLI.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As seções que integram a fundamentação teórica deste trabalho têm por objetivo apresentar conceitos e fundamentos que baseiam os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho, bem como nortear as análises e discussões dos resultados.

### 2.1. Sensoriamento remoto agrícola

Dados de SR são amplamente utilizados para o mapeamento e o monitoramento da atividade agrícola (ATZBERGER, 2013; FORMAGGIO; SANCHES, 2017). A periodicidade e o caráter sinótico desses os tornam imprescindíveis para estudos e para levantamentos relacionados a esta atividade (SANCHES, 2004; WHITCRAFT et al., 2015a). Além de possibilitar a quantificação da área e a distribuição espacial de culturas agrícolas, dados de SR também permitem estimar a produtividade (JOHNSON, 2014), calcular biomassa (BATTUDE et al., 2016), avaliar a deficiência hídrica (MISHRA et al., 2015), inferir sobre a intensificação agrícola (GALFORD et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2014) e monitorar o processo de mudança de uso e cobertura da terra (MORTON et al., 2005; GALFORD et al., 2010), entre outras aplicações.

Programas de monitoramento de culturas agrícolas, a partir de dados de SR, têm sido desenvolvidos em diferentes escalas (i.e. global, nacional e regional). Whitcraft et al. (2015b) destacam a iniciativa intitulada *Global Agricultural Monitoring* (GEOGLAM), estabelecida pelo *Group on Earth Observation's* (GEO). Essa iniciativa tem por objetivo monitorar áreas agrícolas em escala global, fornecendo informações sobre a área cultivada, tipo de culturas, condição da cultura, estimativa de produtividade, entre outros. Com base nessas informações, estratégias podem ser definidas a fim de aprimorar e intensificar a produção agrícola, como por exemplo, identificar lacunas de produtividade e áreas com alta aptidão agrícola (ATZBERGER, 2013). A importância destas informações também está relacionada

ao desafio de atender à crescente demanda de comida e simultaneamente preservar os recursos naturais (FOLEY et al., 2011).

Em escala regional, pode-se destacar o programa desenvolvido pela Agência Nacional de Estatísticas Agrícolas (*National Agricultural Statistics Service - NASS*) do departamento de agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture - USDA*), intitulado *Cropland Data Layer* (CDL). Este programa é responsável por operacionalizar a estimativa da área ocupada por 16 culturas diferentes em 27 estados norte-americanos, por meio de técnicas e dados de SR (BAILEY; BORYAN, 2010). No Brasil, temos dois exemplos de programas de monitoramento de importantes culturas, a cana-de-açúcar (RUDORFF et al., 2010) e o café (MOREIRA et al., 2004).

A maioria destes programas ou iniciativas utilizam séries temporais de imagens, uma vez que a dinâmica das áreas agrícolas (data de semeadura/plantio, tempo de duração do ciclo das culturas, etc.) é geralmente conhecida. A abordagem temporal de uso dos dados de SR, tal como a compreensão das características espectrais de cultivos agrícolas, é fundamental no processo de monitoramento, principalmente de culturas anuais, que possuem ciclo de desenvolvimento mais curto que as culturas perenes ou semiperenes (RISSO, 2013).

Além das características espectrais das culturas e de sua dinâmica temporal, é necessário também considerar as características dos sensores remotos utilizados, principalmente no que tange a resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica. A compreensão destas características permite identificar as possibilidades e limitações da aplicação destes dados no monitoramento da atividade agrícola.

### **2.1.1. Análise espectral**

O comportamento espectral de alvos está relacionado aos processos de reflexão, transmissão e absorção espectral da radiação eletromagnética (REM) incidente

sobre estes. Entretanto, o termo geralmente se refere ao espectro da reflectância, ou seja, a porção refletida da REM pelos tecidos vegetais (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010) e foi adotado no presente trabalho. Segundo Novo (2011), as propriedades químicas, físicas e biológicas dos alvos influenciam na interação entre estes e a REM, afetando diretamente a porção de energia refletida. Ademais, no que concerne à porção da REM refletida e registrada por sensores orbitais, é necessário considerar também as condições atmosféricas, a geometria de aquisição dos dados, o posicionamento topográfico, entre outros (PONZONI et al., 2014).

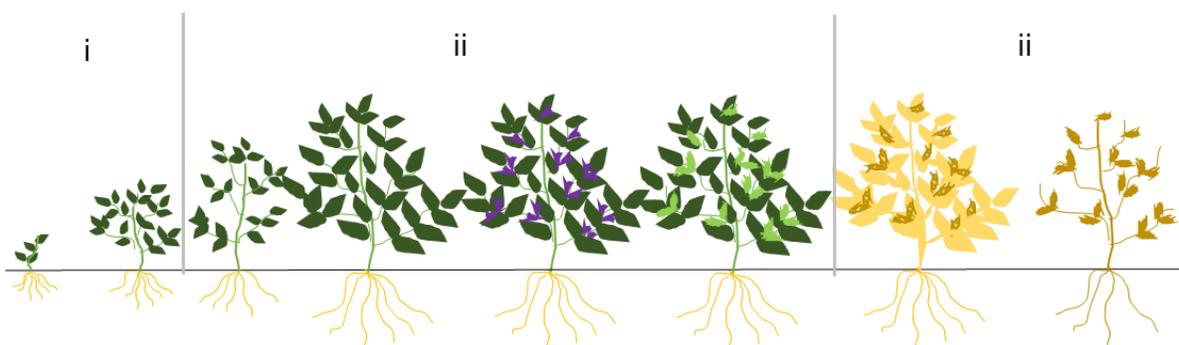
No sensoriamento remoto, a porção da REM refletida pelos elementos da superfície terrestre é registrada pelos sensores em forma de números digitais (NDs), os quais são proporcionais à radiância interceptada pelo sensor. Em análises espectrais multitemporais é necessário converter os NDs em uma grandeza física, geralmente em reflectância, uma vez que a reflectância está relacionada a capacidade dos elementos em refletir a REM incidente sobre eles.

De modo geral, as características espectrais da vegetação podem ser explicadas utilizando três regiões do espectro eletromagnético. Na região do visível (VIS – 0,40 a 0,70  $\mu\text{m}$ ), a reflectância da REM por parte dos dosséis está relacionada à concentração e ao tipo de pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas, como a clorofila, a xantofila e carotenoides. As principais faixas de absorção pelos pigmentos nessa região ocorrem no vermelho (*Red* - 0,65 – 0,66  $\mu\text{m}$ ) e azul (*Blue* - 0,43 – 45  $\mu\text{m}$ ), enquanto que ocorre um pico de reflectância no verde (*Green* - ~0,54  $\mu\text{m}$ ). Contrário à faixa do visível, a vegetação apresenta elevada reflectância na faixa do infravermelho próximo (*near-infrared* - NIR - 0,70 – 1,30  $\mu\text{m}$ ), ocasionada pela estrutura interna da folha (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). A reflectância nesta faixa está relacionada à estrutura interna do mesófilo esponjoso, sendo maior quanto mais lacunosa for a estrutura (JENSEN, 2007). Na região do infravermelho de ondas curtas (*short-wave infrared* - SWIR) a reflectância dos dosséis vegetais é influenciada pela presença de água na estrutura interna das folhas.

Essas características espectrais da vegetação nas diferentes faixas do espectro são referentes a um dossel verde sadio. Entretanto diversos fatores, internos e externos à estrutura da planta, são responsáveis por interferirem na reflectância do dossel. Alguns destes fatores são apresentados e discutidos a seguir.

As diferentes fases fenológicas do ciclo de desenvolvimento das culturas agrícolas acarretam mudanças na estrutura do dossel e, conseqüentemente, em variações nos valores de reflectância ao longo do tempo (GOEL, 1988; BUNNIK,1978). Segundo Formaggio e Epiphanyo (1989), do ponto de vista do sensoriamento remoto agrícola, o ciclo fenológico das culturas anuais e semiperenes pode ser dividido em três fases; i) plantio e emergência, no qual o solo é o principal elemento de interação com a radiação eletromagnética (REM); ii) recobrimento do solo pelo dossel, com posterior formação das flores e dos grãos, ocasionando maior interação por parte da planta com a REM; e iii) período de maturação e senescência da planta. A Figura 2.1 ilustra as três fases de desenvolvimento e as variações na estrutura do dossel da cultura da soja.

Figura 2.1. Fases de desenvolvimento da soja. i) fase inicial; ii) fase de crescimento vegetativo; e iii) fase de senescência.



Fonte: Produção do autor.

Na fase inicial (i), as características do solo, como matéria orgânica, umidade, minerais presentes são principais elementos que influenciam a reflectância da área cultivada. Solos escuros, ricos em matéria orgânica, por exemplo, são responsáveis por baixos valores de reflectância na região do NIR (NAGLER et al., 2000),

enquanto que solos com presença de palhada (e.g., restos da cultura anterior), característico do sistema de plantio direto, apresentam valores mais elevados (McMURTREY et al., 1993). Padrão semelhante foi reportado por Bogrekci e Lee (2004), ao analisarem a reflectância espectral de solos, verificaram que quanto maior o conteúdo de umidade e de fósforo, menores foram os valores de reflectância nas três regiões espectrais.

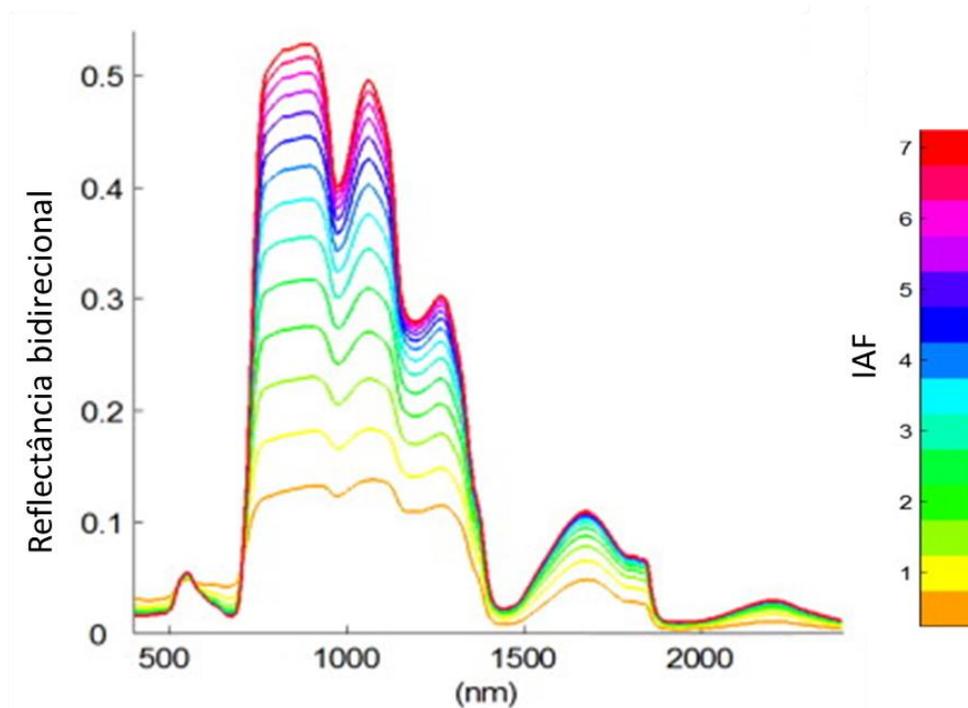
A fase intermediária (ii), ao contrário da anterior, é caracterizada por uma maior influência do dossel vegetal nos valores de reflectância, uma vez que este recobre o espaço entre as fileiras de plantio. As folhas, geralmente, são os elementos predominantes em um dossel, e por isso, suas características influenciam de forma expressiva a reflectância. Dentre as características das folhas, pode-se destacar a estrutura interna, e quantidade das folhas e posição e orientação espacial das mesmas (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

A quantidade e o tipo de pigmentos, como mencionado anteriormente, influenciam principalmente a região espectral do visível, sendo que, de modo geral, quanto maior a concentração destes pigmentos, menores são os valores de reflectância nesta região. Entretanto, essa característica pode ser modificada de acordo com o estado nutricional da planta, por exemplo. Alterações nos valores de reflectância desta região ocasionado pelo estado nutricional da planta são apresentados por Silva e Beyl (2005). Em um estudo conduzido pelos autores, a deficiência de nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em plantas de trigo foi responsável por diminuir a concentração de clorofila e ocasionar um aumento nos valores de reflectância do dossel desta região.

Ainda na fase ii, também ocorre um aumento no número de folhas, o que está ligado a um atributo biofísico da vegetação denominado de Índice de Área Foliar (IAF). Este índice representa o valor da área foliar por unidade de área do terreno (WATSON, 1947). Ao analisarem diferentes valores de IAF, Delegido et al. (2015), identificaram as variações nos valores de reflectância nas três regiões espectrais,

de acordo com o aumento do IAF (Figura 2.2), corroborando com as características da vegetação anteriormente apresentadas.

Figura 2.2. Valores de reflectância nas diferentes faixas espectrais de acordo com o aumento do IAF.

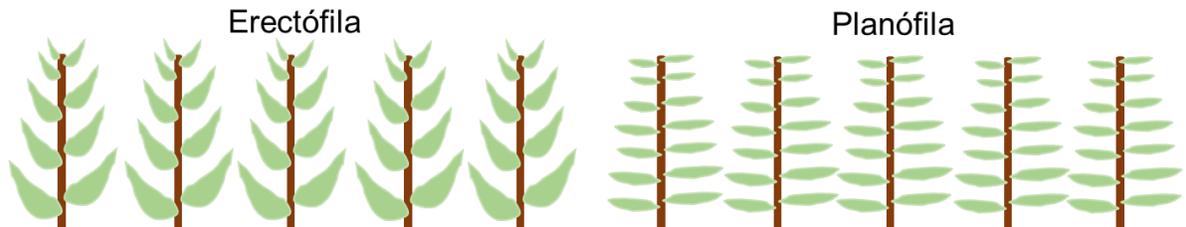


Fonte: Adaptado de Delegido et al. (2015).

Considerando a posição e orientação das folhas de um dossel, Kimes (1984) define que os mesmos podem ser classificados em; a) erectófilo, nos quais prevalecem folhas verticais; b) esférico ou cônico, em que as folhas possuem todos os tipos de orientações; c) planófilo, com folhas horizontais; e d) heliotrópico, nos quais as folhas fazem o sol. Essa distribuição espacial das folhas, que pode variar ao longo das fases de desenvolvimento da planta e está associada ao caráter não lambertiano da vegetação, é responsável por determinar a porção de REM refletida, transmitida e absorvida pelo dossel vegetal. Segundo Jackson e Pinter Junior (1986), dosséis vegetais planófilos (como a soja, que também é heliotrópica) podem refletir de 20% a 30% mais REM do que dosséis erectófilos (como trigo e milho), os

quais direcionam a REM, refletida pelas camadas de folhas, para o interior do dossel (Figura 2.3).

Figura 2.3. Distribuição angular das folhas.



Fonte: Produção do autor.

Na terceira fase (iii), caracterizada pelos processos fenológicos de maturação ou de senescência das plantas, variações significativas nos valores de reflectância são identificados nas três regiões espectrais. A diminuição dos pigmentos, como a clorofila, ocasionada pelo processo de maturação e pela diminuição da quantidade de água na folha (senescência), resulta em um aumento nos valores de reflectância nestas regiões (GITELSON; MERZLYAK, 1994; BOWMAN, 1989).

Paralelamente à influência das diferentes fases de desenvolvimento da planta, outro elemento externo também influencia nos valores de reflectância. Este elemento, denominado de fator de reflectância bidirecional (em inglês – *Bidirectional reflectance distribution function* - BRDF), busca determinar a distribuição da reflectância de acordo com a geometria (ângulos) de iluminação e de visada do sensor (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). A variação do ângulo zenital de iluminação, na maioria dos casos, do sol, juntamente com as características estruturais do dossel, é um elemento importante que influencia os valores de reflectância. Essa influência foi avaliada por Kirchner et al. (1982) no cultivo de alfafa. Segundo os autores, o aumento do ângulo zenital solar, acarretou em um decréscimo nos valores de reflectância das bandas do *Red* e NIR (Landsat 5-TM). Entretanto esse decréscimo é mais evidente nas fases iniciais de desenvolvimento

da cultura, quando suas folhas são mais eretas, e torna-se menos evidente quando a cultura entra na fase de maturação, estágio no qual suas folhas são mais planas.

Outro fator importante que influencia os valores de reflectância, e que está relacionado com o BRDF e os estágios de desenvolvimento, é a disposição das linhas de plantios das culturas agrícolas. Segundo Jackson et al. (1979), dependendo do espaçamento de plantio e da altura das plantas, culturas plantadas em fileiras de orientação Leste-Oeste, tem menor variação na área de solo exposto iluminado pelo sol, quando comparadas com fileiras norte-sul. Isso acarreta em um aumento significativo da reflectância na região do visível para as fileiras de orientação norte-sul ao meio dia, pois nesse horário, o solo entre as fileiras está totalmente iluminado, enquanto que para as fileiras de orientação Leste-Oeste, uma menor variação nos valores de reflectância para a mesma região é observado, uma vez que a porção de solo entre linhas é iluminando desde o período da manhã. Enquanto isso, para a região do NIR, os autores destacam que a influência da orientação das fileiras é menor, pois esta faixa do espectro eletromagnético tem maior transmitância entre as camadas de folhas.

As diferentes variedades de culturas agrícolas disponíveis no mercado também são fatores que interferem no comportamento espectral. Pinter et al. (1985) destacam que as diferentes características de seis variedades de trigo, como arquitetura do dossel, orientação e dimensões das folhas, foram as principais responsáveis por significativas diferenças nos valores de reflectância. Além dessas características, podemos adicionar outras como, quantidade de água no tecido vegetal e diferentes concentrações e tipos de pigmentos.

As características espectrais da vegetação também foram exploradas no desenvolvimento de índices de vegetação (IVs), os quais, geralmente, se baseiam em faixas espectrais antagônicas, como o visível e o NIR, destacando-se o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al., 1974) e o *Enhanced*

*Vegetation Index* (EVI) (HUETE et al., 2002), obtidos pelas Equações 2.1 e 2.2, respectivamente.

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}) \quad 2.1$$

Onde;  $\rho_{\text{nir}}$  é o valor de reflectância para o infravermelho próximo e  $\rho_{\text{red}}$  é valor de reflectância para o vermelho.

$$\text{EVI} = G * (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (L + \rho_{\text{nir}} + C1\rho_{\text{red}} - C2\rho_{\text{blue}}) \quad 2.2$$

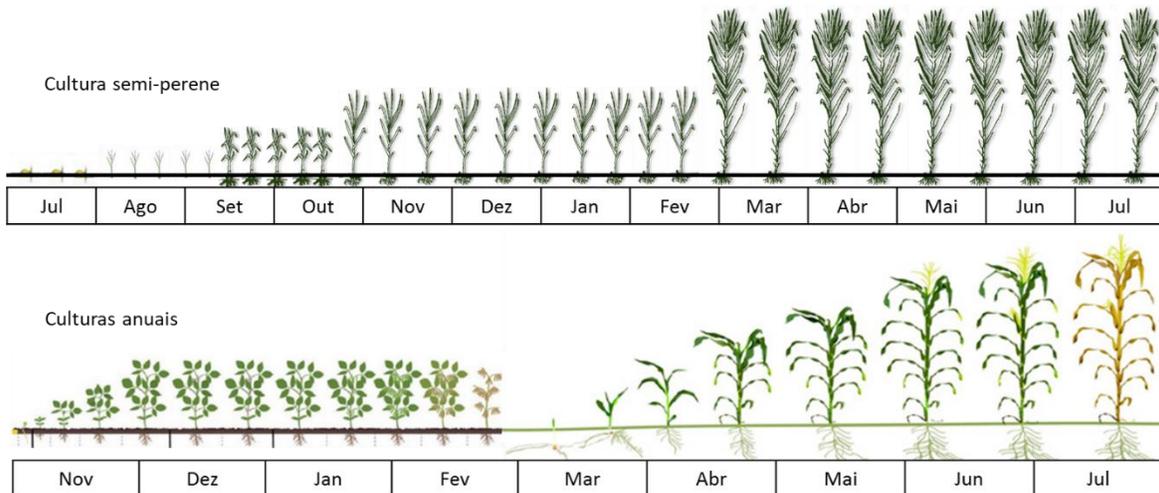
Onde;  $\rho_{\text{nir}}$  é valor de reflectância para o infravermelho próximo,  $\rho_{\text{red}}$  é valor de reflectância para o vermelho,  $\rho_{\text{blue}}$  é valor de reflectância para o azul,  $G = 2,5$ ,  $L = 1$ ,  $C1 = 6$  e  $C2 = 7,5$ .

Inúmeros trabalhos buscaram utilizar estes índices para estimar atributos biofísicos da vegetação, como produtividade (MKHABELA et al., 2011), deficiência de nutrientes (FITZGERALD et al., 2010), biomassa (MOGES et al., 2005), entre outros.

### **2.1.2. Análise multitemporal**

A aquisição de imagens em diferentes estádios da cultura agrícola é fundamental no sensoriamento remoto agrícola (ATZBERG, 2013; FORMAGGIO; SANCHES, 2017). Além da necessidade de diversas imagens, a resolução temporal de aquisição dos dados, que corresponde ao período que o satélite leva para imagear uma mesma área no terreno, também é importante, pois deve ser adequada para acompanhar todo o ciclo de vida das diferentes espécies (anuais, semiperenes ou perenes) cultivadas (Figura 2.4). Portanto, quanto maior esta, melhor a compreensão das fases de desenvolvimento da cultura e maiores as chances de se obter informação sobre o alvo imageado devido à cobertura de nuvens.

Figura 2.4. Ciclo de desenvolvimento de culturas semiperenes e culturas anuais.



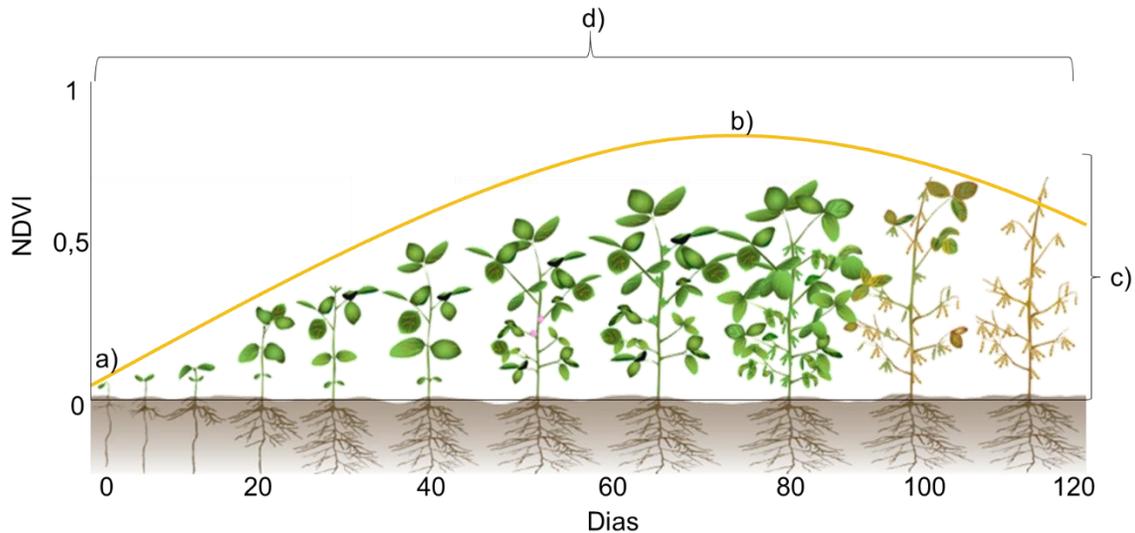
Fonte: Adaptado de Rockenbach et al. (2016); Gascho e Shih (1983); Du Pont – Pionner (2018).

A adoção de diversas imagens para análises que envolvem o comportamento espectral das culturas agrícolas, pois permite identificar estádios de desenvolvimentos chaves para a discriminação espectral de culturas.

Dentre os sensores remotos existentes, o MODIS é o mais utilizado nas análises multitemporais, e tem se destacado em estudos dos ciclos fenológicos da vegetação (ZHANG et al., 2003). A vantagem das imagens geradas por este sensor é ter alta resolução temporal (1-2 dias).

Diversos estudos apresentam a potencialidade das séries temporais de imagens adquiridas pelo sensor MODIS, principalmente de índices de vegetação que são aplicados para múltiplos propósitos, como classificar diferentes culturas a partir de métricas de curvas (Figura 2.4), por exemplo, (WARDLOW et al., 2007; VAN NIEL e McVICAR, 2004), identificar a prática de duas safras (GALFORD et al., 2008), sistemas de manejo (OZDOGAN; GUTMAN, 2008), estádios fenológicos (ADAMI, 2010), entre outros.

Figura 2.5. Variação dos valores de NDVI de acordo com o desenvolvimento da soja e métricas da curva de NDVI; a) valor mínimo, b) valor máximo, c) amplitude, d) duração do ciclo.



Fonte: Adaptado de Dekalb (2018).

O sensor MODIS, com sua alta resolução temporal permite realizar diversas análises relacionadas à atividade agrícola. No entanto, por ter resolução espacial moderada, é adequado apenas para as áreas agrícolas contínuas de grande extensão, como as existentes no Mato Grosso. Sensores com maior resolução espacial e menor resolução temporal também se apresentaram eficientes em programas de monitoramento da agricultura. Rudorff et al. (2010) estabeleceram uma metodologia de monitoramento da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil, com base em séries temporais de imagens Landsat (30 m). Os autores destacaram que o ciclo semiperene da cana é uma vantagem no uso de dados de SR, pois como o ciclo dessa cultura é longo (de 12 a 18 meses), as chances de adquirir imagens livres de nuvens aumentam.

A importância de imagens de sensores de média resolução espacial (~30m) também é compartilhada por Moreira et al. (2004), os quais utilizaram imagens TM/Landsat-5 no mapeamento de áreas de café em Minas Gerais e em São Paulo.

Segundo os autores, em alguns momentos, mesmo com resolução de 30 metros, o mapeamento não é realizado adequadamente em áreas pequenas de café. Além disso, esses dados nem sempre estão viáveis ao uso devido à presença de nuvens, principalmente na época de safra.

Em diversas regiões produtoras do país são necessários dados de média resolução espacial para o monitoramento de áreas agrícolas, bem como alta resolução temporal. Uma alternativa de conciliar e suprir essas duas necessidades é o uso combinado de dados de diferentes sensores. Essa abordagem surge como uma forma de se obter uma série temporal de dados com adequada resolução espacial e temporal. Cita-se como exemplo o trabalho de mapeamento de culturas agrícolas de Waldhoff et. al. (2012) realizado na região oeste da Alemanha. Como a área de estudo dos autores apresentava talhões agrícolas pequenos, foi necessário utilizar dados de sensores de média resolução espacial (TM, ETM+ e IRS-P6) e a abordagem multissensor, a fim de aumentar a disponibilidade de imagens. Os resultados se mostraram satisfatórios e complementares aos processos atuais de levantamento de informações acerca da atividade agrícola para a região.

### **2.1.3. Análise espectro – temporal**

A integração de dados multiespectrais e multitemporais, permite identificar a dinâmica de reflectância espectral da vegetação ao longo do tempo nas diferentes faixas espectrais. Essa integração recebe o nome de análise espectro-temporal. Alguns estudos foram efetuados utilizando dados espectro-temporais (i.e. reflectância) com o objetivo de analisar e/ou verificar características de culturas agrícolas ao longo do tempo.

Vieira et. al, (2000), utilizando a abordagem espectro-temporal, desenvolveram o método *Spectral-Temporal Response Surface* (STRS) para diferenciar culturas agrícolas em uma pequena região da Inglaterra. De acordo com os autores, o método STRS considera que culturas agrícolas possuem curvas espectrais diferentes entre as distintas fases de desenvolvimento. Nesse sentido, a abordagem

espectro-temporal, adotada pelo método STRS, permite gerar curvas espectrais ao longo do tempo nas diversas faixas espectrais. A partir dessa premissa, o pixel de uma imagem passa a ter três dimensões, sendo o x referente ao tempo, o y à faixa espectral e o z referente ao valor de reflectância. Utilizando interpoladores, os autores geraram superfícies que descrevem a variação da reflectância nas faixas espectrais, ao longo do tempo, de alguns alvos agrícolas (como batata e trigo), a partir de imagens de sensores de média resolução espacial (TM/Landsat-5 e HRV/SPOT). Posteriormente foram aplicados classificadores supervisionados sobre tais superfícies, tendo como base pixels amostrais de cada cultura.

Uma conclusão similar é compartilhada por Rudorff et al. (2007), os quais aplicaram o método STRS em imagens do sensor MODIS para o mapeamento de soja no estado do Rio Grande do Sul. Os autores destacam que o STRS demonstrou potencial na classificação das áreas de soja, principalmente em regiões de latifúndios, uma vez que a exatidão nestas áreas foi melhor quando comparada a regiões de minifúndio, ocasionadas pela baixa resolução espacial do MODIS.

Seguindo a mesma metodologia, Mello (2009) avaliou o uso do STRS no mapeamento das áreas de colheita de cana-de-açúcar com e sem a prática da queima a partir de imagens Landsat-5/TM. Utilizando séries temporais de imagens livres de nuvens entre os meses de abril e novembro de 2007 (período de colheita da cana no estado de SP), o autor concluiu que a metodologia STRS mostrou-se adequada para mapear as áreas de colheita da cana-de-açúcar.

Sanches (2004) realizou um estudo do comportamento espectro-temporal de diversas culturas agrícolas em três municípios do estado de São Paulo, a partir de imagens TM e ETM+/Landsat. Nesse estudo foi possível separar espectralmente os alvos em quatro grupos: i) soja e feijão; ii) cana-de-açúcar; milho e mata, iii) sorgo, milheto, pastagem e palhada; e iv) solo exposto. Essa separação ocorreu pelas diferenças encontradas nos valores de reflectância considerando todas as bandas espectrais das imagens TM e ETM+/Landsat. Essa separação, segundo a autora,

pode ser explicada por características como: distribuição espacial das folhas (soja e feijão são planófilas, enquanto que milho e cana são erectófilas); grupo taxonômico (soja e feijão são de uma mesma família, milho e sorgo são de outra); densidade de semeadura; época de plantio (milheto e sorgo são plantados na safrinha, em regime de sequeiro, com presença de palhada da cultura anterior); teor de clorofila das plantas; espaçamento entre fileiras de plantio; etc.

Com o objetivo de realizar o mapeamento da área ocupada com quatro culturas frutíferas em uma região do Chile, Peña e Brenning (2015) extraíram o perfil espectro-temporal das plantas, a partir de oito imagens OLI/Landsat-8. Os autores compararam classificadores que utilizavam a informação espectro-temporal de todas as bandas do sensor e também os perfis espectro-temporais de NDVI e do *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Ao comparar os resultados da classificação realizada com base na informação espectro-temporal de todas as bandas e a classificação baseadas nos perfis espectro-temporais dos IVs, os autores concluíram que os classificadores que utilizaram todas as bandas apresentaram melhor desempenho. Os autores ainda destacaram que são poucos os trabalhos que utilizam a informação espectro-temporal completa das imagens, focando apenas em perfis temporais de índices de vegetação. O uso da informação espectral completa se apresenta como uma importante abordagem na classificação de diferentes culturas.

Como mencionado anteriormente, a resolução espacial é um dos limitantes do uso de dados de sensoriamento remoto na agricultura, principalmente em regiões produtoras caracterizadas por pequenos talhões. Entretanto, a continuidade de programas de monitoramento da terra, especialmente a partir de sensores de média resolução espacial, como OLI/Landsat-8 (lançado em 2013) e OLI/Landsat-9 (lançamento previsto para 2023), e o desenvolvimento de constelações de satélites de mesmo sensor, como o MSI/Sentinel-2A (lançado em 2015) e o MSI/Sentinel-2B (lançado para 2017), poderão fornecer dados com maior resolução temporal, possibilitando o aprimoramento de metodologias existentes ou o desenvolvimento

de novas. Além disso, a disponibilização desses dados com maiores níveis de processamento, como imagens em valores de reflectância de superfície ou índices de vegetação, otimizarão a aplicação do sensoriamento remoto na agricultura.

## **2.2. Estádios de desenvolvimento fenológico do milho, soja e cana-de-açúcar**

Conforme relatado no item 2.1.3, para o sensoriamento remoto agrícola é de suma importância conhecer o ciclo fenológico das culturas agrícolas. Os períodos (dias) dos principais estádios de desenvolvimento fenológico das culturas do milho, soja e cana-de-açúcar são apresentados a seguir.

### **2.2.1. Fenologia da soja (*Glycine max*)**

De acordo com Fehr e Caviness (1977), o período de desenvolvimento da soja (cultura anual) é dividido em estádios vegetativos e reprodutivos. O primeiro compreende o período entre a emergência da plântula e a abertura da primeira flor, enquanto que o segundo se inicia a partir desse momento até a maturação completa da planta. Ressalta-se que o intervalo entre cada período pode ser diferente dentre as variedades existentes.

O ciclo fenológico completo da soja pode variar entre 90 a 200 dias, sendo que a duração deste define se determinada cultivar é precoce ( $\leq 115$  dias), semiprecoce (116 – 125 dias), média (126 – 137 dias), semitardia (138 – 150 dias) ou tardia ( $> 150$  dias) (RISSO, 2013; FARIAS et al., 2000).

De modo geral, as cultivares de soja de ciclo precoce são mais utilizadas no Brasil devido à prática da segunda safra na mesma área (safrinha). É comum o plantio da soja entre os meses de outubro e novembro, sendo a colheita entre meados de janeiro e durante o mês de fevereiro. Tipicamente, logo após a colheita da soja, é realizado o plantio de culturas como milho, algodão, sorgo, entre outros.

### **2.2.2. Fenologia do milho (*Zea mays*)**

O ciclo de desenvolvimento do milho (cultura anual), similar ao da soja, também é dividido em fases vegetativas e reprodutivas, sendo que a primeira se refere do momento da emergência até o pendoamento, enquanto que a fase reprodutiva compreende desde o surgimento dos estilos-estigmas até a maturação dos grãos (MAGALHÃES; DURÃES, 2006). No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) classifica as cultivares, considerando desde o período da emergência até a maturação, em três grupos; Grupo I (< 110 dias), Grupo II (>110 e < 145 dias); e Grupo III (>145 dias).

De acordo com Cruz et al. (2006), no território brasileiro, o milho safra é plantado de agosto a janeiro, enquanto que o milho safrinha pode ser plantado entre fevereiro e abril, sucedendo, geralmente, uma cultura de verão. Esses intervalos de plantio estão relacionados com as diferentes condições climáticas existentes entre as regiões produtoras do país.

### **2.2.3. Fenologia da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)**

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, podendo ser cultivada durante um ano (cana de ano) ou um ano e meio (cana de ano e meio). A época de plantio para a cana de ano e meio é de janeiro a março, enquanto que para cana de ano é de outubro a novembro. A colheita, independentemente do ciclo, ocorre entre os meses de abril a dezembro na região centro sul do Brasil (Aguiar et. al. 2011). Após sucessivos processos de rebrota, a área de cana de açúcar deve ser submetida a um processo de reforma, normalmente efetuada com o plantio de uma cultura de ciclo curto (como amendoim ou soja) (RUDORFF et al., 2010). Essa medida, realizada geralmente a cada intervalo de 5 a 7 anos, tem por objetivo aumentar a produtividade da área, pois ao longo dos sucessivos processos de rebrota a produtividade diminui.

O cultivo de cana-de-açúcar apresenta algumas denominações de acordo com a sua idade e/ou fase desenvolvimento. O termo cana-planta corresponde à cana-de-açúcar de primeiro ciclo, ou seja, foi plantada e submetida ao primeiro corte. A partir do primeiro corte, a cana passa a ser denominada de cana-soca, uma vez que seu crescimento se deu a partir da rebrota da soqueira (WEBER et. al., 2001; HANAUER, 2011).

### **2.3. Moderate resolution imaging spectroradiometer – MODIS**

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais, abrangendo a região do visível, infravermelho e termal do espectro eletromagnético (0,405 e 14,385  $\mu\text{m}$ ). A atuação das bandas do MODIS em diferentes regiões espectrais permite que seus dados sejam aplicados em ambientes terrestres (bandas de 1-7), em ambientes marinhos (bandas 8-16), em estudos atmosféricos (bandas 17-19) e em estudos que envolvem a porção termal (bandas 20 -36, exceto a 26) (JUSTICE et. al., 2002). O sensor está a bordo de duas plataformas orbitais, o satélite Terra e Aqua, lançados em 1999 e em 2002 respectivamente (ANDERSON et. al., 2003). A resolução espacial do sensor MODIS é diferente entre as bandas espectrais, sendo de 250m nas bandas 1-2, de 500m nas bandas 3-7 e 1 km nas bandas 8-36.

Vários produtos são obtidos a partir dos dados deste sensor e possuem aplicações distintas (ADAMI, 2010). Em estudos da vegetação, um dos produtos mais explorados pela comunidade científica é o referente aos IVs, como o produto MOD13Q1. Este produto consiste em imagens dos IVs NDVI e EVI com resolução espacial de 250 metros e temporal de 16 dias (HUETE et al., 1999).

### **2.4. Operational land imager - OLI/Landsat-8**

O Landsat-8 é uma plataforma orbital desenvolvida com o intuito de continuar a missão Landsat (*Landsat Data Continuity Mission - LDCM*). Essa plataforma transporta dois sensores orbitais a 705 km de altitude, o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O sensor OLI é um sensor *pushbroom*

(cerca de 7.000 detectores) que obtém imagens da mesma área a cada 16 dias em nove bandas espectrais, com resolução espacial de 30 metros (exceto pancromática – 15 metros) e resolução radiométrica de 12 bits (IRONS et. al, 2012). A Tabela 2.1 apresenta as bandas desse sensor, as respectivas faixas espectrais e a resolução espacial.

Tabela 2.1. Bandas espectrais, resolução espacial e faixas espectrais do sensor OLI/Landsat-8.

<b>Banda</b>	<b>Resolução espacial</b>	<b>Faixa espectral</b>	<b>Nome</b>
B1	30	0,43 – 0,45	<i>Coastal/Aerosol</i>
B2	30	0,45 – 0,51	<i>Blue</i>
B3	30	0,53 – 0,60	<i>Green</i>
B4	30	0,64 – 0,67	<i>Red</i>
B5	30	0,85 – 0,88	<i>NIR</i>
B6	30	1,56 – 1,65	<i>SWIR I</i>
B7	30	2,11 – 2,29	<i>SWIR II</i>
B8	15	0,50 – 0,69	<i>Panchromatic</i>
B9	30	1,36 – 1,39	<i>Cirrus</i>

Fonte: Adaptado de Irons et. al. (2012).

O recebimento, o processamento e a disponibilidade das imagens OLI é de responsabilidade da agência do Serviço de Levantamento Geológico Americano (*United States Geological Survey - USGS*). Essas imagens são disponibilizadas em forma de produtos, sendo que cada um possui um nível de processamento (e.g., correção geométrica, radiométrica). O produto intitulado *Landsat Surface Reflectance (level 2A product)* consiste em imagens cujos números digitais foram convertidos para valores de reflectância de superfície por meio de um processo de correção atmosférica. De acordo com Vermote et al. (2016), o algoritmo de correção atmosférica, baseado no modelo *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Vectorial (6SV)*, foi desenvolvido com o intuito de utilizar as bandas espectrais do próprio sensor OLI, como a banda *cirrus* e *coastal aerosol*, e também dados auxiliares de alta qualidade do sensor MODIS, no processo de correção.

As imagens convertidas para reflectância de superfície do sensor OLI começaram a ser disponibilizadas pela agência em dezembro de 2014, permitindo análises mais rápidas de elementos da superfície terrestre, principalmente em abordagens multitemporais.

## **2.5. Análise de agrupamento**

Análises estatísticas são utilizadas de diversas formas em dados de sensoriamento remoto. Classificadores supervisionados, por exemplo, utilizam parâmetros estatísticos, como média e matriz de covariância, para classificar ou agrupar feições semelhantes em imagens de sensores orbitais.

A análise de agrupamento (AA) é uma técnica de estatística multivariada que objetiva gerar grupos homogêneos a partir de um conjunto de dados (LANDIM, 2003). Esse particionamento em grupos é realizado com bases nas variáveis (características) associadas ao conjunto de dados (MINGOTI, 2005). De acordo com Landim (2003), a análise de agrupamento pode ser baseada em quatro técnicas gerais: i) de partição; ii) com origem arbitrária; iii) por similaridade mútua; e iv) por agrupamentos hierárquicos. A técnica de agrupamento hierárquico parte do pressuposto que cada elemento de análise é um elemento isolado (um *cluster*), sendo estes agrupados em grupos conforme o coeficiente de similaridade utilizado (MINGOTI, 2005). Estes coeficientes de similaridades podem ser calculados com base em medidas de correlação, medidas de distância ou medidas de associação. No método hierárquico, a análise de agrupamentos se encerra no momento em que todos os elementos estejam em um só grupo.

Normalmente, os resultados da análise de agrupamento por método hierárquico são representados na forma de dendrogramas, os quais demonstram os níveis de similaridades, por exemplo, por meio da distância euclidiana (Equação 2.3), (KAUFMAN; ROUSSEEUW, 2009),

$$d(i, j) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + (x_{i\ldots} - x_{j\ldots})^2 + (x_{ip} - x_{jp})^2} \quad 2.3$$

onde,  $i$  e  $j$  são os objetos,  $x_{in}$  e  $x_{jn}$  ( $n$  varia de 1 até  $p$ ) são os valores da variável de cada objeto.

No dendrograma também é possível definir um limiar para a distinção dos grupos (clusters) mais ou menos semelhantes. A escolha do valor do limiar, que pode ser feita de modo arbitrário, envolve o conhecimento e experiência do usuário. Uma alternativa para definir este limiar é a geração de um gráfico de sequência de agrupamentos. Este gráfico informa em quais distâncias (ou outra unidade) ocorre a formação dos grupos. A definição do limiar pode ser baseada na ocorrência de um platô vertical nesse gráfico, ou seja, esse platô ocorre quando objetos com baixa similaridade são englobados em um grupo.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende um trajeto de 100 km, ao longo da rodovia SP 340, a qual transpassa cinco municípios da região nordeste do estado de São Paulo, i.e., Estiva Gerbi, Aguaí, Mococa, Mogi- Guaçu e Casa Branca (juntos abrangem 3.129 km<sup>2</sup>). O monitoramento mensal de talhões agrícolas neste trajeto foi uma das atividades desenvolvidas no projeto intitulado “Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Monitoramento Agrícola para o Brasil via Dados de Satélites de Observação da Terra” (Projeto 402597/2012-5 do Programa Ciência sem Fronteiras).

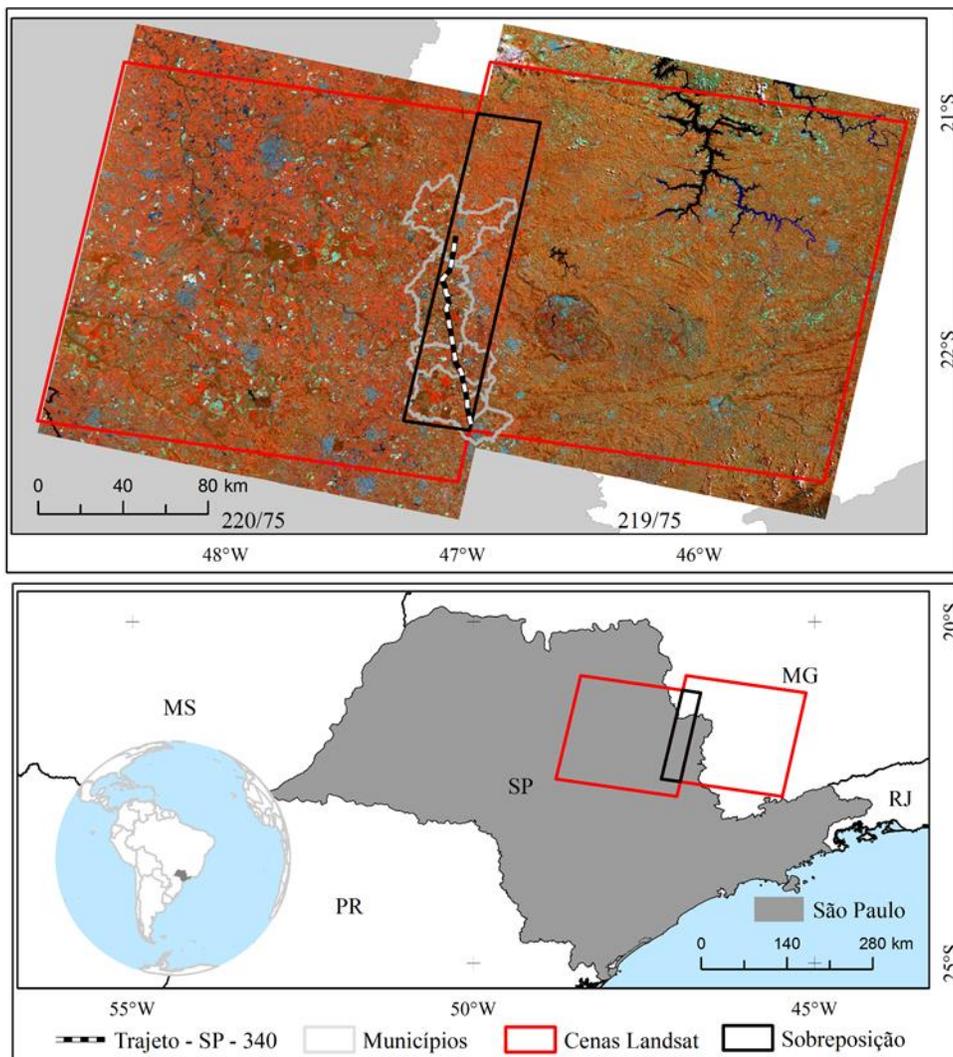
Os cinco municípios se encontram em uma região de sobreposição das órbitas/pontos 219/75 e 220/75 (cenas) do satélite Landsat-8 (Figura 3.1). Essa sobreposição ampliou a probabilidade de se obter imagens livres de nuvens, uma vez que permitiu a aquisição de imagens a cada 7 ou 9 dias (LUIZ et al., 2015). Outra vantagem da área de estudo é que os talhões se localizam próximos à rodovia SP-340, facilitando o acesso e, conseqüentemente, o monitoramento dos talhões das áreas.

As culturas selecionadas para esta pesquisa foram a soja, o milho e a cana-de-açúcar. De acordo com informações do IBGE, em 2015, cerca de 65.500 ha foram cultivados com cana-de-açúcar nos cinco municípios, enquanto que o milho ocupou 35.900 ha e a soja 4.200 ha. Essas culturas são cultivadas com diferentes formas de manejo (plantio irrigado, sequeiro, prática de duas safras - safra/safrinha -, plantio direto, plantio convencional, etc.).

O período de plantio recomendado para a região, de acordo com o zoneamento agrícola de risco climático, é entre outubro e abril para a cana-de-açúcar, de outubro a dezembro para a soja, de setembro a dezembro para o milho primeira safra e de janeiro a fevereiro para milho segunda safra.

O relevo da área de estudo é composto por áreas planas ou suave onduladas, o que propicia a atividade agrícola; e os solos da região são compostos por latossolos vermelho e latossolos vermelho-amarelo (IBGE, 2001).

Figura 3.1. Mapa de localização da área de estudos. Imagem OLI/Landsat-8. Composição falsa-cor R5G6B4.

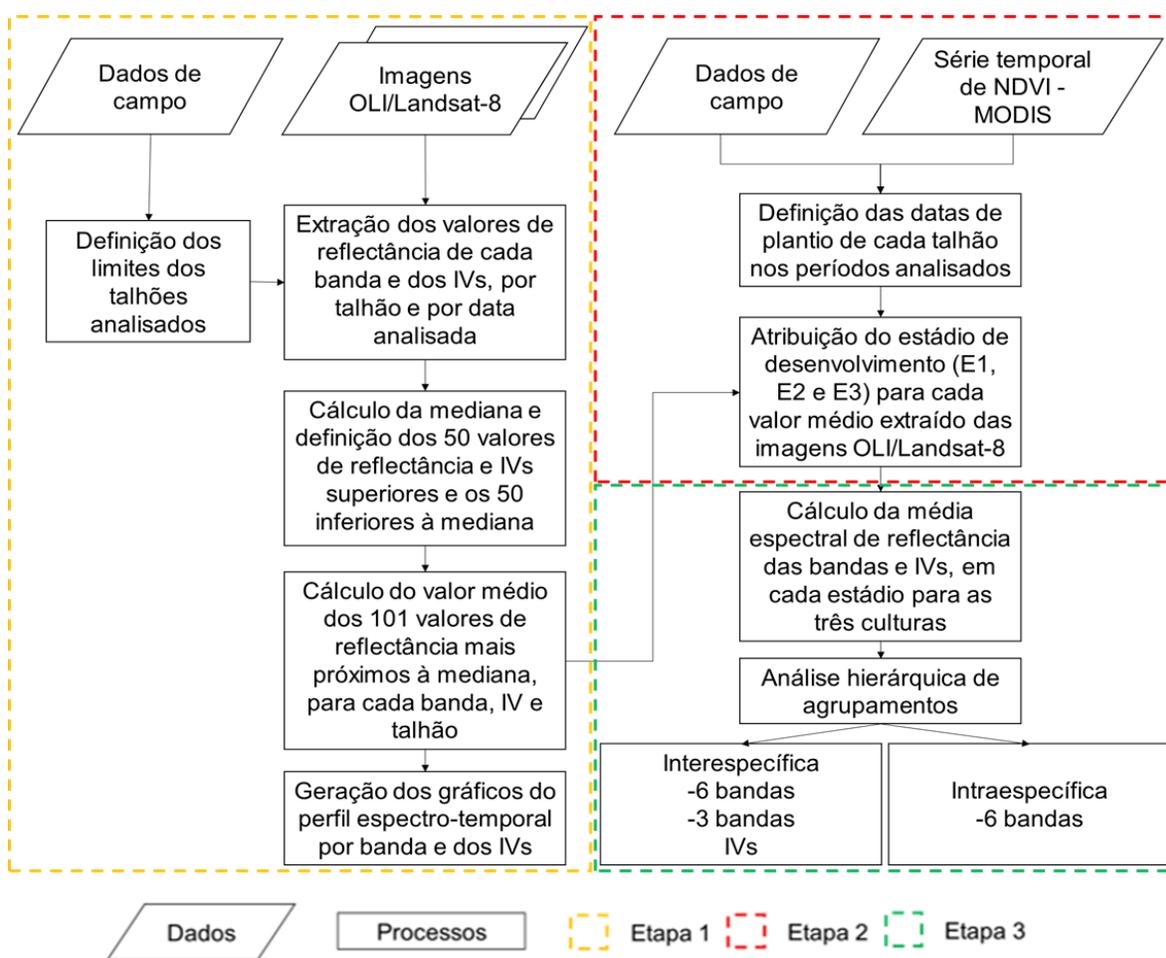


Fonte: Produção do autor.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 4.1 sintetiza as atividades efetuadas ao longo desta pesquisa.

Figura 4.1. Fluxograma das etapas metodológicas efetuadas na presente pesquisa.



Fonte: Produção do autor.

Os materiais utilizados para a realização desta pesquisa consistem em dados de campo, série temporal de imagens do sensor OLI/Landsat-8 e série temporal de NDVI do sensor MODIS/TERRA. Todas as características destes materiais, bem como os métodos adotados serão descritos a seguir.

#### **4.1 Dados de campo**

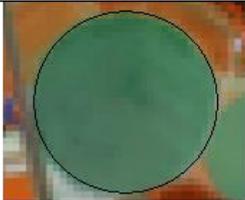
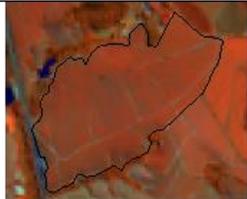
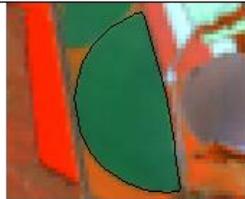
Os dados de campo foram obtidos a partir de visitas mensais a talhões cultivados com soja, milho e cana-de-açúcar localizados ao longo do trajeto apresentado na Figura 3.1. A esses talhões foram atribuídos identificadores numéricos (id) (Tabela 4.1). Durante as visitas mensais foram monitorados 55 talhões de diversos usos, cada talhão recebeu um id. No presente trabalho só foram avaliados os talhões de soja, milho e cana-de-açúcar, e por esse motivo os ids dos talhões utilizados nesta pesquisa não possuem numeração consecutiva. A frequência mensal das visitas, em datas próximas à passagem do sensor OLI na área de estudo, permitiu acompanhar as fases de desenvolvimento (estádio fenológico) de cada cultura, registradas por meio de fotografias e anotações em cadernetas de campo, além da identificação e comparação destas fases nas imagens obtidas. Em alguns talhões monitorados se praticava o sistema de cultivo de sequeiro (sem irrigação), enquanto que em outros havia sistemas de irrigação por pivô central. A informação pertinente a irrigação foi inferida por meio da observação desta prática durante as visitas mensais. Foram analisados 30 talhões de milho, oito talhões de soja e nove de cana-de-açúcar. Destaca-se que o autor desta pesquisa não participou dos trabalhos de campo, sendo que apenas utilizou os dados coletados de um projeto preexistente.

O período de monitoramento ocorreu entre outubro de 2014 a outubro de 2016, compreendendo duas safras completas, 2014/2015 e 2015/2016. Devido à prática de segunda safra (safrinha) na área de estudo, a seguinte conceituação foi adotada: os talhões cultivados no período entre os meses de agosto e dezembro foram considerados cultivos de safra (primeira safra – s14/15 e s15/16), enquanto que os cultivos posteriores a dezembro e que sucederam o ciclo de outra cultura, foram denominados de cultivo safrinha (segunda safra – s15 e s16). Salienta-se que o termo safrinha é aplicado apenas às culturas anuais (soja e milho) e não para a cana-de-açúcar (semiperene). Durante os dois anos de monitoramento, foi possível verificar dois ciclos (plantio/rebrota e colha) da cultura da cana-de-açúcar. Esses

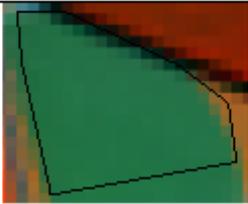
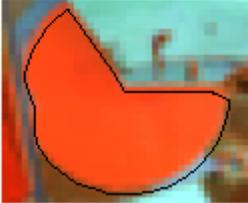
dois ciclos receberam a seguinte conceituação. A abreviação “c1” refere-se ao primeiro ciclo dos talhões monitorados, enquanto que o “c2” refere-se ao segundo ciclo dos talhões monitorados. É importante salientar que esses ciclos são apenas os relacionados aos dois anos de monitoramento. Não se referem à idade do talhão, ou seja, não se referem à cana planta ou cana soca.

As áreas dos talhões foram delimitadas utilizando imagens do sensor OLI/Landsat-8 e imagens de alta resolução espacial do acervo do *Google Maps*, por meio da vetorização manual. O critério utilizado para delimitação consistiu na homogeneidade da área, juntamente com dados de campo. Os talhões que foram analisados apresentam dimensões e sistemas de manejo diferentes, i.e., sequeiro, irrigado por pivô central ou irrigado com carretel (Tabela 4.1). Estas características distintas entre os talhões, juntamente com os diferentes períodos de cultivo (safra e safrinha), foram fundamentais para compreender as variações intraespecíficas e interespecíficas das culturas analisadas.

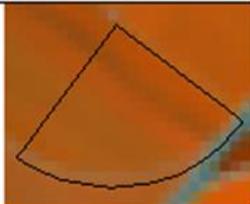
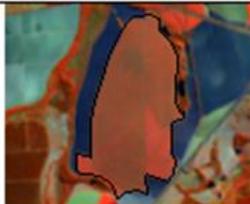
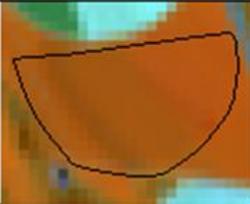
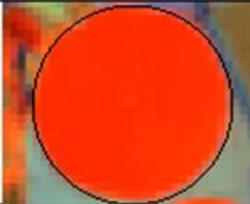
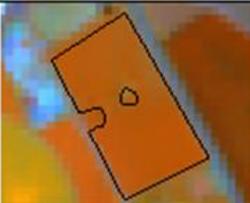
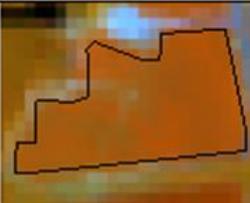
Tabela 4.1. Descrição das principais características dos talhões analisados. Imagem OLI/Landsat-8 na composição falsa-cor R5G6B4.

	id		
	4	5	6
			
Localização (x y)	-46,97838258 -22,20534315	-46,98254185 -22,18629895	-46,98153395 -22,16769903
Área (ha)	61,77	52,46	177,38
Irrigado	Não	Sim (Pivô)	Não
Período de análise	S14/15 S15/16	S 14/15 S 15/16 s 16	c1
	id		
	7	8	9
			
Localização (x y)	-46,9840776 -22,15801161	-46,99365103 -22,13936048	-47,00223976 -22,08641602
Área (ha)	175,89	75,44	163,46
Irrigado	Não	Não	Não
Período de análise	c1 c2	S 15/16	c1 c2
	id		
	10	11	12
			
Localização (x y)	-47,02428213 -22,0590641	-47,02507882 -22,0526343	-47,02958483 -22,02981626
Área (ha)	36,44	39,40	54,51
Irrigado	Não	Sim (pivô)	Sim (Pivô)
Período de análise	S 14/15 S 15/16 s 16	S 14/15 S 15/16 s 16	S 14/15 s 16

continua

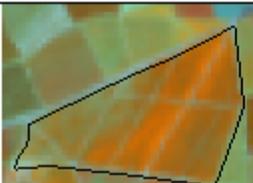
id			
	13	14	17
			
Localização (x y)	-47.03138937 -22.02322583	-47.03197858 -22.01925199	-47.0429695 -21.93022201
Área (ha)	22,25	18,97	170,67
Irrigado	Sim (Pivô)	Sim (Pivô)	Não
Período de análise	S 14/15 s 16	S 14/15 s 16	c2
id			
	18	24	25
			
Localização (x y)	-47.04920565 -21.91161542	-47.05859121 -21.67510223	-47.04049506 -21.61190903
Área (ha)	45,37	12,28	33,24
Irrigado	Sim (Pivô)	Sim (Pivô)	Não
Período de análise	S 14/15 s 15 S 15/16	S 14/15 s 15 s 16	S 14/15
id			
	26	33	35
			
Localização (x y)	-47.03897549 -21.60419552	-47.04624679 -21.59652492	-47.06116524 -21.64461556
Área (ha)	39,77	100,57	290,93
Irrigado	Não	Sim (Pivô)	Não
Período de análise	S 14/15	S 14/15 s 15 s 16	c1

continua

id			
	36	37	38
			
Localização (x y)	-47.05518178 -21.66430772	-47.05764505 -21.66745987	-47.05764505 -21.66745987
Área (ha)	16,5	17,91	195,79
Irrigado	Sim (pivô)	Sim (pivô)	Não
Período de análise	S 14/15 S 15/16 s 16	S 14/15 S 15/16 s 16	c2
id			
	39	40	41
			
Localização (x y)	-47.0885151 -21.71159032	-47.08590517 -21.71754419	-47.07617189 -21.73616922
Área (ha)	20,87	47,80	17,98
Irrigado	Sim (pivô)	Sim (pivô)	Sim (pivô)
Período de análise	S 14/15 S 15/16	S 14/15 S 15/16	S 14/15 S 15/16
id			
	43	45	50
			
Localização (x y)	-47.06404374 -21.79211107	-47.06991333 -21.83807257	-47.03882853 -22.03211676
Área (ha)	18,87	24,53	195,04
Irrigado	Não	Sim (carretel)	Não
Período de análise	S 14/15 S 15/16 s 16	S 14/15 S 15/16	c1 c2

continua

Conclusão tabela 4.1

	id	
	52	53
		
Localização (x y)	-47.0025939 -22.15122921	-46.99219677 -22.18658382
Área (ha)	71,09	41,33
Irrigado	Não	Sim (pivô)
Período de análise	S 14/15 S 15/16	S 14/15 S 15/16 s 16

Fonte: produção do autor.

## 4.2 Imagens do sensor OLI/Landsat-8

Foram utilizadas 54 imagens OLI/Landsat-8 do produto *Landsat Surface Reflectance* (Tabela 4.2). As imagens desse produto estão em valores de reflectância de superfície. A descrição do algoritmo de correção atmosférico utilizado neste produto encontra-se em Vermote et al. (2016).

Tabela 4.2. Datas das imagens OLI/Landsat-8 referentes às órbitas/pontos 2019/75 e 220/75.

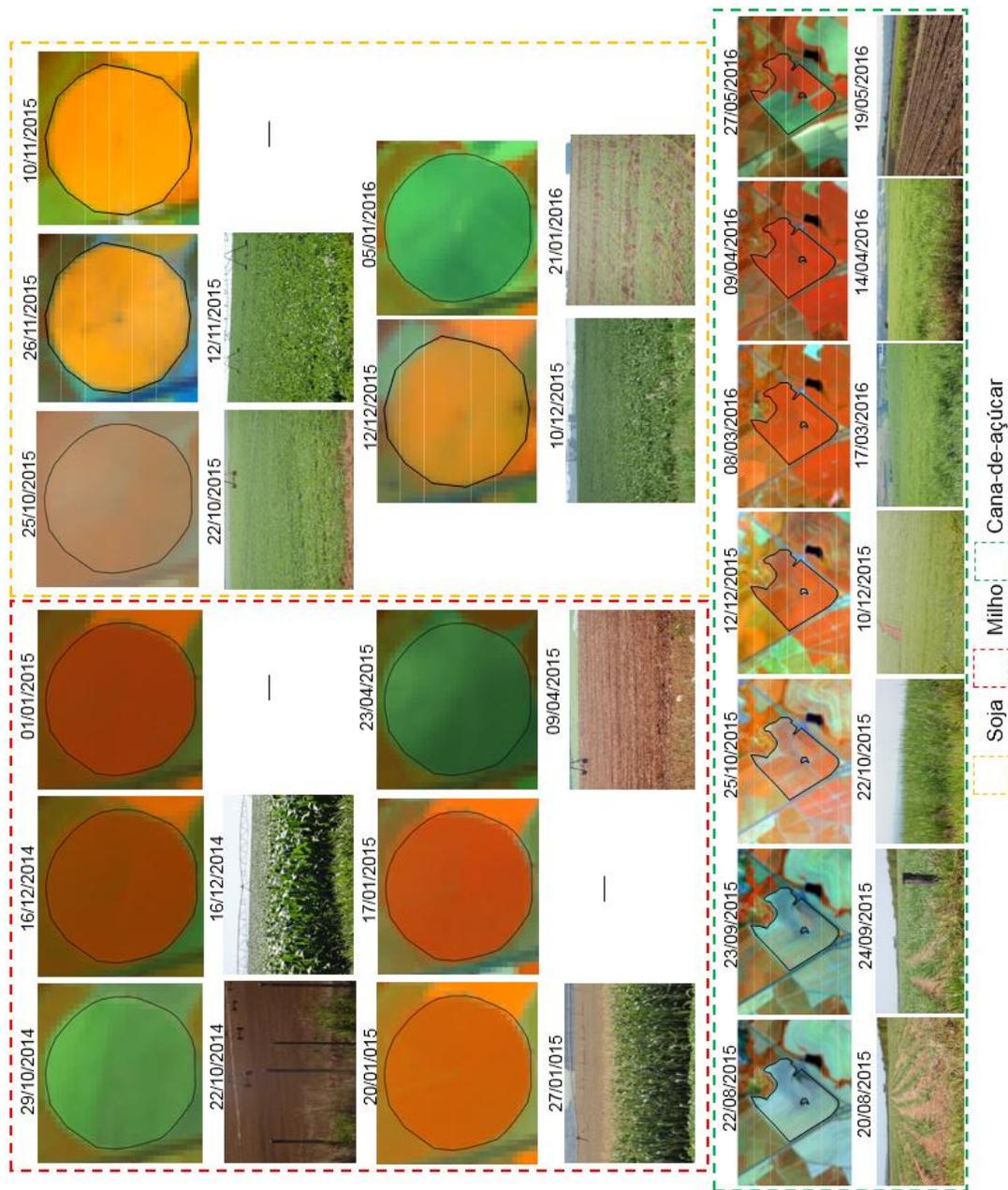
Datas das imagens OLI/Landsat-8					
19/08/2014	01/01/2015	10/06/2015	10/11/2015	25/04/2016	30/07/2016
04/09/2014	10/01/2015	26/06/2015	26/11/2015	04/05/2016	08/08/2016
11/09/2014	17/01/2015	12/07/2015	12/12/2015	27/05/2016	15/08/2016
06/10/2014	16/04/2015	28/07/2015	20/01/2016	12/06/2016	24/08/2016
13/10/2014	23/04/2015	22/08/2015	05/02/2016	21/06/2016	09/09/2016
22/10/2014	02/05/2015	23/09/2015	08/03/2016	28/06/2016	16/09/2016
29/10/2014	09/05/2015	09/10/2015	17/03/2016	07/07/2016	25/09/2016
16/12/2014	25/05/2015	16/10/2015	02/04/2016	14/07/2016	02/10/2016
25/12/2014	03/06/2015	25/10/2015	09/04/2016	23/07/2016	11/10/2016

Fonte: Produção do autor.

O critério de seleção das imagens foi a ausência de nuvens na área dos talhões. A ocorrência de nuvens foi verificada em duas etapas. A primeira etapa, preliminar,

foi durante a aquisição das imagens. A segunda ocorreu a partir da análise visual individual dos talhões, sobrepondo o limite dos mesmos com a série temporal das imagens OLI/Landsat-8 (Figura 4.2).

Figura 4.2. Exemplificação da série temporal de imagens OLI/Landsat-8 durante o ciclo de desenvolvimento do milho, soja e cana. Composição falsa-cor R5G6B4.



Fonte: Produção do autor.

Com essa abordagem foi possível identificar que existiam imagens com presença parcial de nuvens, ou seja, as nuvens se localizam apenas em algumas regiões das mesmas. Assim, o número de imagens disponíveis entre os talhões, mesmo que cultivados na mesma safra ou safrinha, foi diferente, variando mais entre as safras quando comparado com as safrinhas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Número de imagens livres ou parcialmente livres de nuvens por talhão e por safra. As siglas c1 e c2 se referem ao primeiro e segundo ciclo dos talhões de cana, respectivamente.

Id	Safras/safrinhas				c1	c2
	safras 2014/15	safrinhas 2015	safras 2015/16	safrinhas 2016		
4	4		3			
5	4		3	7		
6					21	
7					12	7
8			1			
9					17	8
10	4		1	6		
11	5		1	5		
12	5			4		
13	5			6		
14	4			7		
17						14
18	4	8	1			
24	4	7		5		
25	5					
26	5					
33	7		2	8		
35					19	
36	4		3	6		
37	3		3	6		
38						15
39	3		1			

continua

Continuação tabela 4.3

40	7	1	
41	3	1	
43	5	2	11
45	4	1	
50			17 20
52	5	2	
53	4	1	10

Fonte: Produção do autor.

Em concordância com o escopo deste trabalho, foram utilizadas seis bandas do OLI: as bandas do visível correspondentes às faixas espectrais do *Blue* (B2), *Green* (B3) e *Red* (B4), do NIR (B5) e SWIR (B6 e B7). Adicionalmente às bandas, foram calculadas o NDVI e EVI de todos os talhões analisados.

Após a definição das imagens disponíveis para a análise (livres ou parcialmente livres de nuvens), uma primeira avaliação subjetiva do produto de reflectância de superfície foi realizada por meio de inspeção visual. Perfis de reflectância de algumas feições, como corpos hídricos, áreas de floresta nativa, floresta plantada, áreas agrícolas, foram geradas e analisadas, verificando possíveis inconsistências nos valores de reflectância das bandas utilizadas. Nenhuma discrepância foi encontrada.

#### 4.3 Série temporal de NDVI - MODIS/Terra

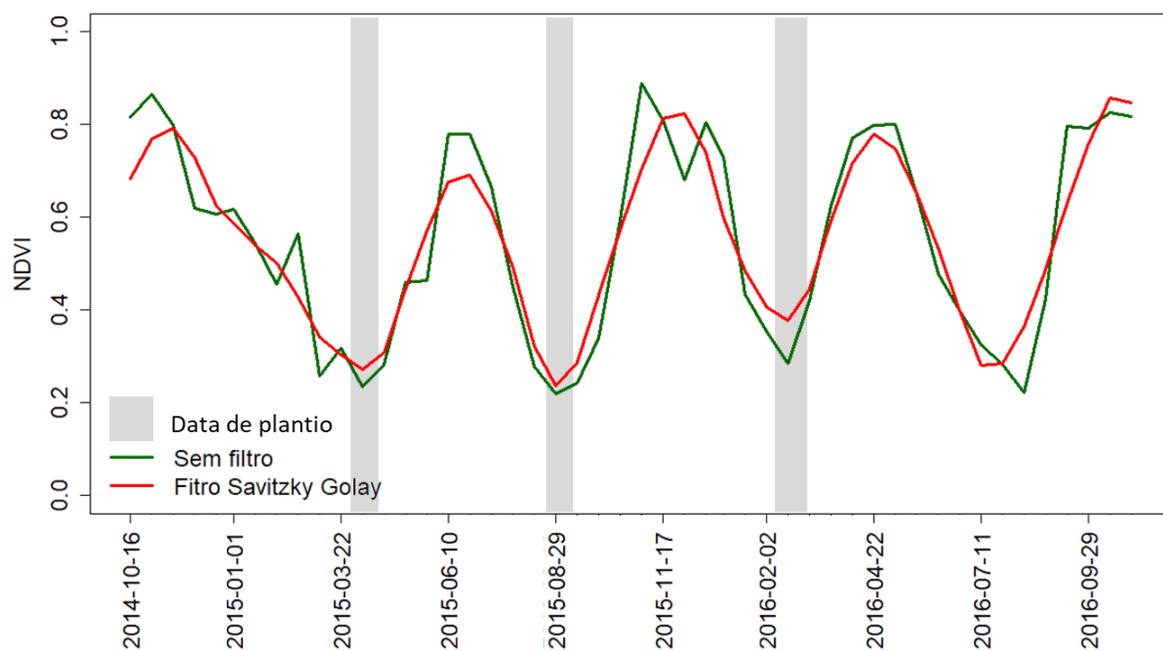
Foram utilizadas séries temporais de NDVI do sensor MODIS/Terra, com resolução espacial de 250 metros e temporal de 16 dias, que compreendiam o período de outubro de 2014 a outubro de 2016. As séries foram extraídas do Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg). Esta é uma ferramenta web gratuita desenvolvida pela Embrapa Informática Agropecuária a qual disponibiliza os perfis temporais dos índices de vegetação NDVI e EVI do sensor MODIS.

As séries obtidas são referentes à coordenada central de cada talhão, ou seja, foram extraídas apenas curvas do pixel do sensor MODIS central de cada talhão. O

objetivo de obter apenas a série temporal de NDVI do pixel central consiste em evitar a influência das bordas dos talhões. As séries foram suavizadas por meio do filtro Savitzky–Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964) com janela temporal de 4, disponível na própria ferramenta SATVeg.

Estas séries temporais foram utilizadas para estimar a data de plantio de cada cultura, principalmente dos talhões em que não foi possível obter essa informação dos dados coletados em campo (Figura 4.3). No presente estudo, a identificação da data de plantio é essencial para determinar corretamente os estádios de desenvolvimento das culturas e poder comparar adequadamente os perfis temporais dos diferentes alvos.

Figura 4.3. Exemplo de série temporal de NDVI do sensor MODIS sem e com filtro. Os círculos amarelos representam as datas estimadas de plantio.



Fonte: Produção do autor.

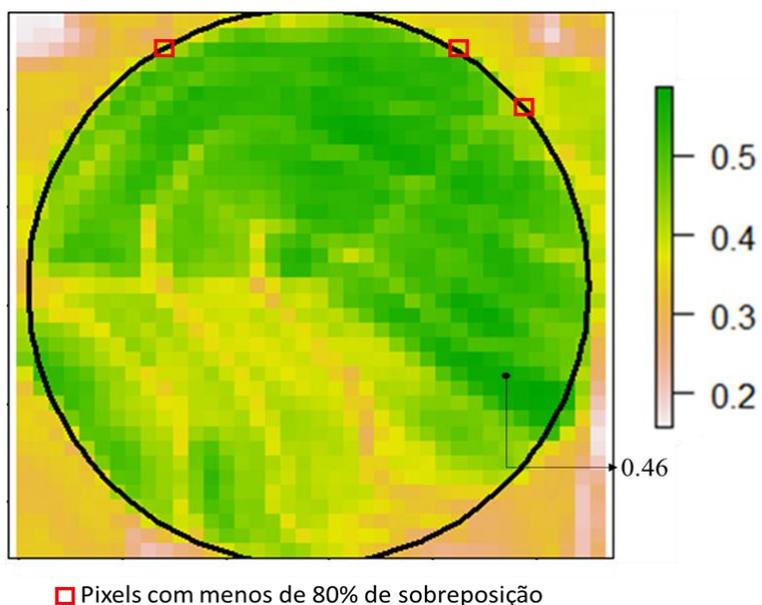
A metodologia empregada nesse estudo para definir a data de plantio, com base na série temporal de NDVI, é a proposta por Adami (2010). Segundo o autor, a data de plantio pode ser definida como a data de mínimo valor do índice, ou seja, com base

no ponto de inflexão da curva da série temporal. Destaca-se que uma hierarquia de decisão foi estabelecida para o processo de definição das datas de plantio. Prioritariamente foram utilizadas as anotações obtidas por meio das visitas mensais do trabalho de campo. Entretanto, esta informação não constava para todos os talhões analisados. Nestes casos, as datas de plantio foram estimadas por meio da metodologia proposta por Adami (2010).

#### 4.4 Extração dos valores de reflectância

Para realizar a análise do perfil espectro-temporal de culturas baseada em dados do sensor OLI/Landsat-8, o seguinte procedimento foi adotado para a extração dos valores de reflectância. Primeiramente, foi realizada a extração dos valores de todos os pixels com mais de 80% de sobreposição pelo limite do talhão (Figura 4.4). Esse limiar de 80% de sobreposição foi a primeira estratégia utilizada para eliminar o efeito de borda.

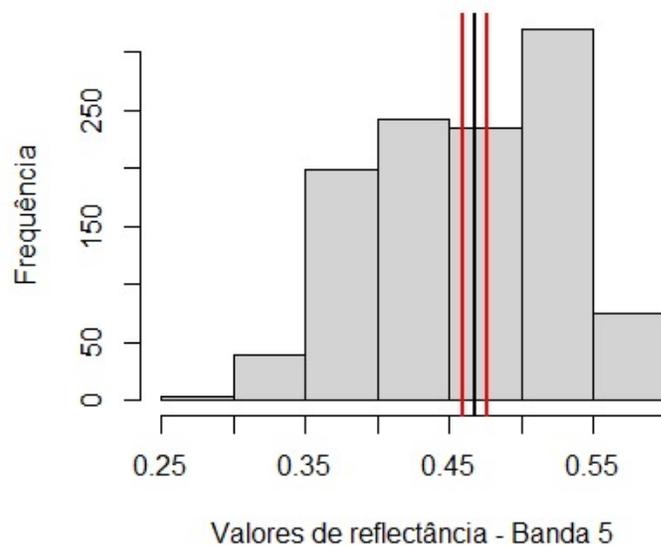
Figura 4.4. Extração dos valores de reflectância da banda 5 da imagem OLI de 27/04/2016. Os pixels destacados pelo quadrado branco são exemplos de valores que não foram extraídos devido à restrição de 80%. A seta indica um pixel com o valor da mediana.



Fonte: Produção do autor.

Após a extração de todos os valores de pixels com sobreposição maior que 80% pelo limite do talhão, foi realizado o cálculo da mediana. Posteriormente, foram selecionados os 50 pixels com valores menores e os 50 pixels com valores maiores que a mediana, totalizando 100 valores + mediana (Figura 4.5). Esse processo foi empregado a fim de utilizar apenas os valores de reflectância dos pixels mais representativos dos talhões de cada cultura (evitar pixels com valores extremos). Além disso, todos os talhões, independente do seu tamanho original, passaram a ser representados sempre por 101 pixels. O mesmo processo foi aplicado para todos os talhões, em todas as bandas e datas, bem como para os dados de índices de vegetação NDVI e EVI.

Figura 4.5. Exemplo de todos os valores de reflectância referentes à banda 5 da imagem OLI de 27/04/2016. A linha vertical preta indica o valor de mediana calculado e as linhas vermelhas localizadas à direita e a esquerda são os 50 valores mais próximos à mediana.



Fonte: Produção do autor.

A etapa seguinte consistiu no cálculo da média aritmética dos 101 valores extraídos anteriormente para cada banda, data, talhão e cultura. A média gerada nesta etapa foi empregada nas análises descritas nas seções seguintes.

Os processos de extração dos valores de todos os pixels, cálculo da mediana, a definição dos 101 valores e o cálculo da média foram realizados no programa R (apêndice A.1). Esses valores, bem como a data de cada imagem e as respectivas bandas, foram salvos em planilhas eletrônicas para posterior análise do perfil espectro-temporal das culturas.

#### **4.5 Geração dos gráficos do perfil espectro-temporal por banda e dos índices de vegetação**

Apesar do termo comportamento espectral da vegetação ser amplamente utilizado na literatura, neste trabalho adotou-se o termo perfil espectro-temporal. Essa decisão é justificada pelo fato de que os valores espectrais empregados nesta pesquisa foram obtidos apenas com base no sensor OLI. Assim, é necessário destacar que o perfil espectral obtido nesta pesquisa para cada cultura, pode ser diferente de outros estudos que utilizaram sensores diferentes.

A geração de gráficos do perfil espectro-temporal de cada talhão permitiu avaliar a qualidade e a ocorrência de inconsistências nos valores médios das imagens OLI/Landsat-8 utilizadas. Esta análise teve por objetivo comparar os valores de cada banda e índice com os dados de campo, avaliando se o perfil espectro-temporal era compatível com o esperado de acordo com a fase de desenvolvimento da planta verificado em campo. Esses perfis espectro-temporais foram baseados apenas nas imagens livres de nuvens e na média dos 101 valores.

Como os talhões foram cultivados em épocas diferentes, foi necessário ajustar o ciclo de desenvolvimento de cada talhão. Esse ajuste foi baseado na data de plantio de cada talhão, ao qual foi atribuído o dia artificial (DA) zero. O intervalo de dias entre a data de plantio e a data da imagem OLI/Landsat-8, seguinte ao plantio, foi definida como o segundo valor de dia artificial. Por exemplo, um talhão de soja foi plantado em 1/10/2014, data na qual foi atribuído valor 0 (zero) para o DA, e a imagem OLI/Landsat-8, seguinte à data de plantio, foi obtida em 10/10/2014, logo, o segundo DA será 9 (10/10 menos 1/10). Esse processo foi empregado para todas

as datas que compreenderam o ciclo de desenvolvimento das culturas em cada talhão.

#### **4.6 Definição dos estádios de desenvolvimento de cada cultura**

Os estádios de desenvolvimento adotados no presente trabalho compreendem os estádios vegetativos e reprodutivos das plantas, e foram definidos a partir de bibliografias e dos dados de campo. A adoção destes estádios surgiu como uma proposta de padronizar os dados, uma vez que a disponibilidade de imagens entre os talhões acarretou em perfis espectrais com diferente disponibilidade de dados. Assim, a padronização por meio da média aritmética dos valores de cada estágio, permitiu comparações entre talhões da mesma cultura e entre culturas em cada estágio.

Definiu-se como estágio um (E1) o período que compreende a fase de emergência da planta ou rebrota (no caso da cana) até o início do recobrimento do solo entre fileiras pelo dossel vegetal. O estágio dois (E2) corresponde ao período de máximo desenvolvimento vegetativo e dossel predominantemente constituído de folhas verdes. E por fim, o terceiro estágio (E3) abrange o período de senescência até a colheita. Como a maioria das áreas de cana-de-açúcar analisadas correspondem a ciclos de um ano, e esta cultura apresenta uma estabilização no índice de área foliar, foi adotada apenas a divisão dos estádios um e dois (TOPPA et al., 2010).

Após a extração de todos os dados, iniciou-se o processo de atribuição dos estádios de desenvolvimento de cada cultura com base nas datas da série temporal de NDVI do sensor MODIS e nas datas das imagens OLI/Landsat-8. O processo foi realizado da seguinte maneira para as médias dos 101 valores: i) Com base na data de plantio de cada talhão, em cada safra e safrinha, somou-se o número de dias referente a cada estágio; ii) As datas das imagens OLI/Landsat-8 que compreendiam o respectivo estágio, receberam um atributo caracterizando este estágio (E1, E2 e E3). A Figura 4.4 apresenta o número de dias que compreende cada estágio de desenvolvimento.

Tabela 4.4. Número de dias que compreende cada estágio da soja, milho e cana. Estádio 1 (E1), estágio 2 (E2) e estágio 3 (E3)

Culturas	E1	E2	E3
Soja	0-35	35-80	+80
Milho	0-35	35-90	+90
Cana	0-90	+90	Não se aplica

Fonte: Produção do autor.

A definição dos estádios adotados para a cultura da soja foi baseada na metodologia proposta por Adami (2010). Baseando-se nas análises do autor, definiu-se como E1 o período entre a semeadura e as fases de desenvolvimento V4-V5 (~35 dias), que corresponde ao momento em que a planta começa a recobrir o solo entre as filas de semeadura. O E2 foi definido como o período entre as fases V4-V5 e R5-R6 (~45 dias), nas quais os grãos estão em processo final de formação. O estágio 3 foi definido como o restante do ciclo a partir dos estádios R5-R6.

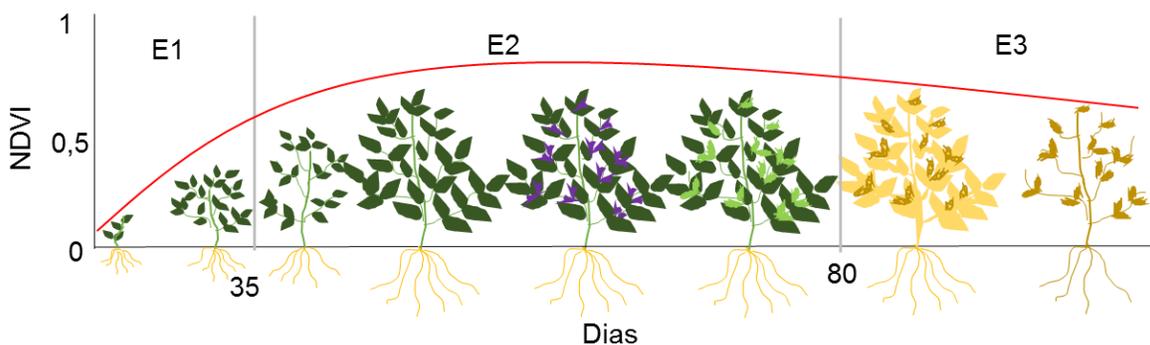
De forma similar à metodologia empregada na definição dos estádios da soja, o ciclo de desenvolvimento do milho também foi dividido em três estádios. Como E1 foi considerado o período de 35 dias após a emergência da planta. Nesse período, segundo Fancelli (2015), a planta de milho se encontra na fase de desenvolvimento V8 ou 2, a qual é caracterizada pelo crescimento do diâmetro e comprimento do colmo. O E2 compreende o período entre as fases V8 e R2 ou 6, as quais são caracterizadas pelo período de preenchimento dos grãos. Esse estágio ocorre por volta de 85-90 dias após a emergência. Os estádios de desenvolvimento restantes até o momento da colheita, foram definidos como pertencentes ao estágio 3.

A definição dos estádios da cana seguiu a mesma abordagem para as duas culturas anteriores, mas algumas modificações tiveram que ser adotadas por se tratar de uma cultura semiperene e apresentar, portanto, um ciclo mais longo que as outras duas culturas. O primeiro estágio foi definido como o intervalo entre o plantio ou rebrota até o recobrimento do solo pelo dossel. Como a cultura da cana apresenta um desenvolvimento mais lento e a distância entre as filas de plantio é maior quando

comparada às áreas de milho e soja, esse estágio compreendeu o período de 90 dias. Esse valor de dias foi definido com base nos dados de campo e análise das imagens de satélite. O estágio dois foi estabelecido como o período posterior aos primeiros 90 dias até o momento da colheita. O estágio três não foi utilizado para a cultura da cana, pois, como destacam Toppa et al. (2010), o período de maturação da cana que tem interesse econômico ocorre mais cedo do que a maturação botânica. Segundo os autores, o período de maturação vegetativo, o qual é de interesse comercial, é caracterizado pelo momento de máximo armazenamento de sacarose. Adicionalmente, os autores enfatizam que mesmo no período de redução da temperatura e da disponibilidade hídrica, característico da região sudeste do Brasil e que favorece a maturação vegetativa, o processo de fotossíntese continua ocorrendo normalmente. Nesse sentido, a cultura da cana permanece com predominância de folhas verdes na porção superior do dossel até o momento da colheita.

A Figura 4.6 ilustra o desenvolvimento fenológico da soja (A) e os respectivos dias dos estádios adotados no presente trabalho. O índice de vegetação NDVI foi empregado para ilustrar as variações ao longo do desenvolvimento vegetativo da planta.

Figura 4.6. Estádios de desenvolvimento da soja com os respectivos intervalos de dias.



Fonte: Produção do autor.

É importante destacar que essa atribuição dos estádios de acordo com a data das imagens OLI/Landsat-8 foi realizado para os valores médios obtidos com base nos 101 valores extraídos de cada talhão, por banda e por safra ou safrinha analisados.

#### **4.7 Análise hierárquica de agrupamento**

Para a realização da análise hierárquica de agrupamento (AHA) o seguinte procedimento foi adotado. A partir da definição dos estádios de desenvolvimento de acordo com as datas das imagens, foi calculada a média aritmética para cada banda e IV com base em todas as imagens que compreendiam os respectivos estádios. Por exemplo, um talhão de soja, cultivado na safra 2014/15, apresentou três imagens referentes ao E1, quatro imagens no E2, e uma imagem no E3. Logo, a média do E1 foi obtida com base nas três imagens, a média do E2 a partir das quatro imagens e a média do E3 foi obtida com base na única imagem deste período. Esses valores médios espectrais foram os dados de entrada para a AHA, a qual foi empregada separadamente para 4 conjuntos de dados. O primeiro formado pelas 6 bandas espectrais; o segundo formado pelas 3 bandas (B3, B5, B6); o terceiro pelo índice NDVI; e o quarto constituído pelo índice EVI. Como as AHA foram divididas em conjuntos de dados com a mesma unidade de medida (mesma grandeza), não foi necessário aplicar nenhum processo de normalização.

A primeira etapa da AHA consistiu em calcular a distância euclidiana entre as médias de todas as bandas, independentemente das culturas, caracterizando a análise interespecífica. Esse cálculo da distância euclidiana também foi realizado exclusivamente para cada índice, independentemente da cultura. Posteriormente, a AHA utilizou os valores da distância euclidiana para a formação dos clusters, unindo primeiramente os elementos com distância menores entres si, uma vez que a AHA agrupa de acordo com a similaridade dos elementos. O método empregado corresponde ao método Ward. Esses elementos unidos possuíam identificadores (id), os quais representavam as culturas analisadas. Assim, a AHA, considerada

análise não supervisionada, apenas agrupou os elementos com base nos valores espectrais ou dos IVs, sem nenhuma informação referente às culturas.

A análise intraespecífica foi efetuada considerando o mesmo procedimento supracitado, entretanto com grupos de dados de entrada divididos de acordo com cada cultura. Os resultados da AHA foram expressos por meio de dendrogramas que ilustram a formação dos grupos mais similares de acordo com os valores da distância euclidiana.

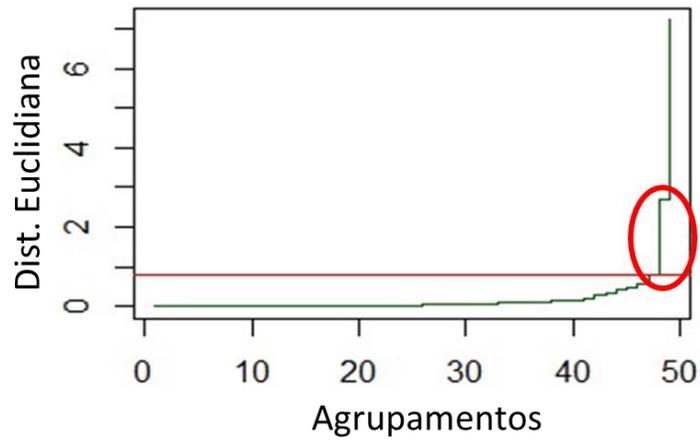
Em ambas as análises, apenas o valor médio de cada banda, obtido com base nas imagens que compreendem o E2 de cada cultura, foi utilizado. A justificativa para analisar somente este estágio é a falta de dado nos outros estágios. Apenas alguns talhões possuíam imagens disponíveis nos estágios E1 e E3, impossibilitando principalmente as análises intraespecíficas.

#### **4.8 Definição do limiar de similaridade**

A definição do limiar de similaridade foi realizada por meio do gráfico sequencial de agrupamentos, o qual é um dos elementos utilizados neste tipo de análise para definição da distância mais adequada para formação dos grupos mais similares.

O gráfico de agrupamentos expressa o número de grupos formados de acordo com a distância euclidiana “percorrida”. A ocorrência de um intervalo longo (distância euclidiana) entre a formação de um grupo e o seu consequente, expressa o momento em que o valor “percorrido” de distância euclidiana foi maior, ou seja, indica o valor em que os grupos apresentaram maior dissimilaridade. Esse momento é geralmente identificado pela ocorrência de um platô vertical no gráfico de sequência de agrupamentos (Figura 4.7).

Figura 4.7. Exemplo de um gráfico de seqüências de agrupamento. O platô vertical destacado pelo elipse em vermelho ilustra o limiar que pode ser utilizado como limiar de similaridade.



Fonte: Produção do autor.

## 5. RESULTADOS

As seções a seguir apresentam os resultados obtidos. Estes são apresentados na mesma sequência que os objetivos específicos definidos neste trabalho.

### 5.1 Perfis espectro-temporais

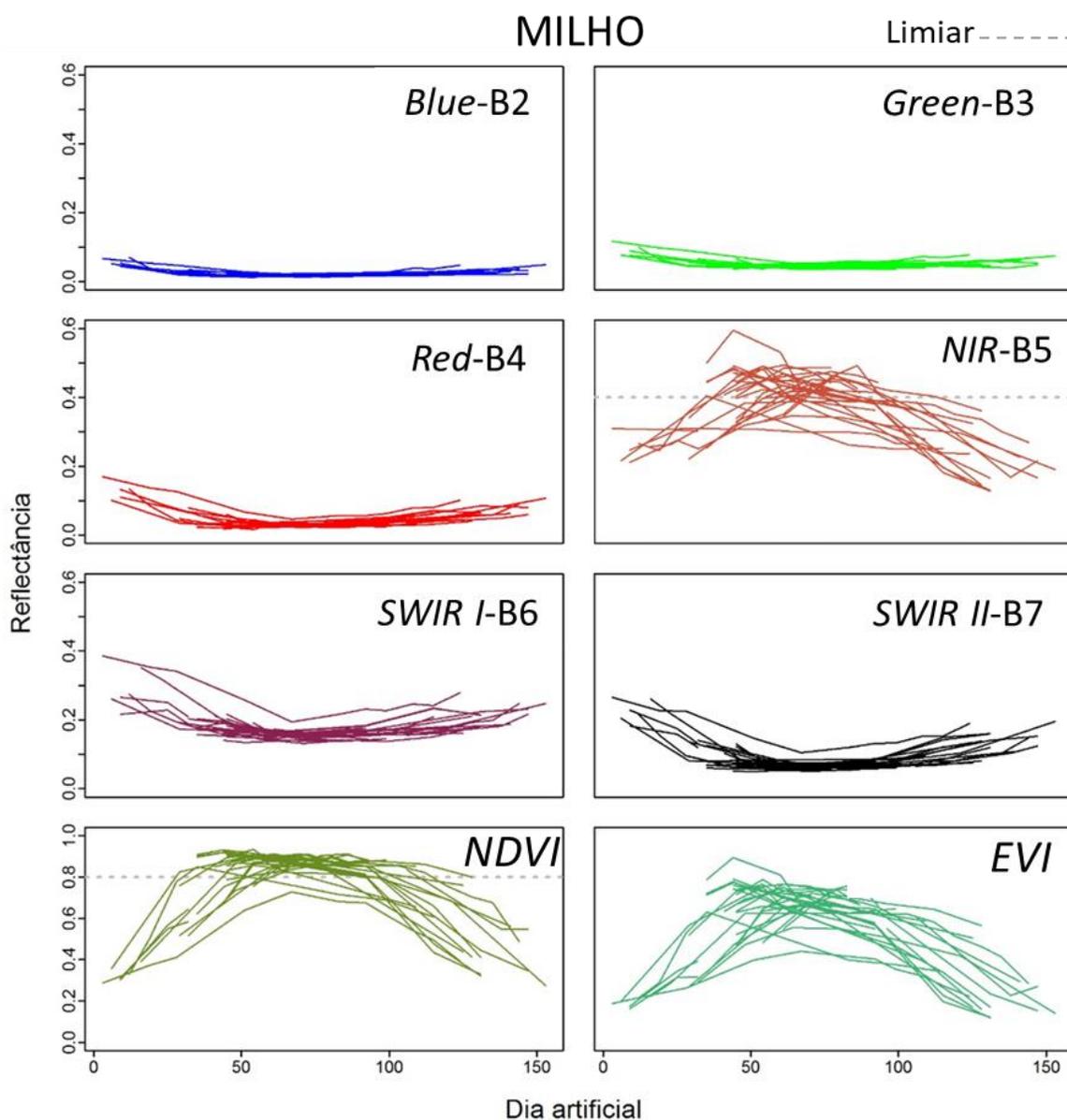
A geração dos perfis espectro-temporais foi realizada para cada cultura com base nos valores médios (dos 101 valores originais) de cada banda e de cada índice de vegetação (IV). Os perfis se referem a todos os talhões cultivados com soja, milho e cana-de-açúcar durante os dois anos de monitoramento, independentemente do número de imagens disponíveis em cada safra ou safrinha.

De modo geral, os perfis espectro-temporais das Figuras 5.1 (milho), 5.2 (soja) e 5.3 (cana-de-açúcar) apresentam o comportamento típico esperado da vegetação. Para as culturas anuais (milho e soja), pode-se assumir que o período de máximo desenvolvimento coincide com o centro dos dias artificiais. Neste período é possível identificar que a banda B5 (NIR) detém as maiores diferenças entre os talhões analisados. Assim, a fim de facilitar as análises futuras, limiares foram estabelecidos na banda B5 (NIR) e no IV NDVI, os quais são 0,4 e 0,8 respectivamente (linha cinza tracejada). Esses limiares foram estabelecidos com base nos perfis de reflectância da cultura do milho, os quais apresentaram maiores adensamentos dos perfis nestas bandas e nestes valores. Além disso, é verificado também e demonstrado a seguir, que os talhões abaixo desses limiares foram responsáveis por inconsistências nas análises de agrupamento destas culturas (milho e soja).

Na Figura 5.1 (milho), a linha cinza tracejada destaca o adensamento das curvas desta banda B5 (NIR) acima do valor 0,4 de reflectância. Apenas algumas curvas estão abaixo desse limiar no momento de máximo desenvolvimento. Um padrão semelhante é verificado nos perfis da soja (Figura 5.2), apresentando valores superiores a 0,4 de reflectância como indicado pela linha cinza. Já os talhões de cana-de-açúcar (Figura 5.3) apresentam valores abaixo de 0,4.

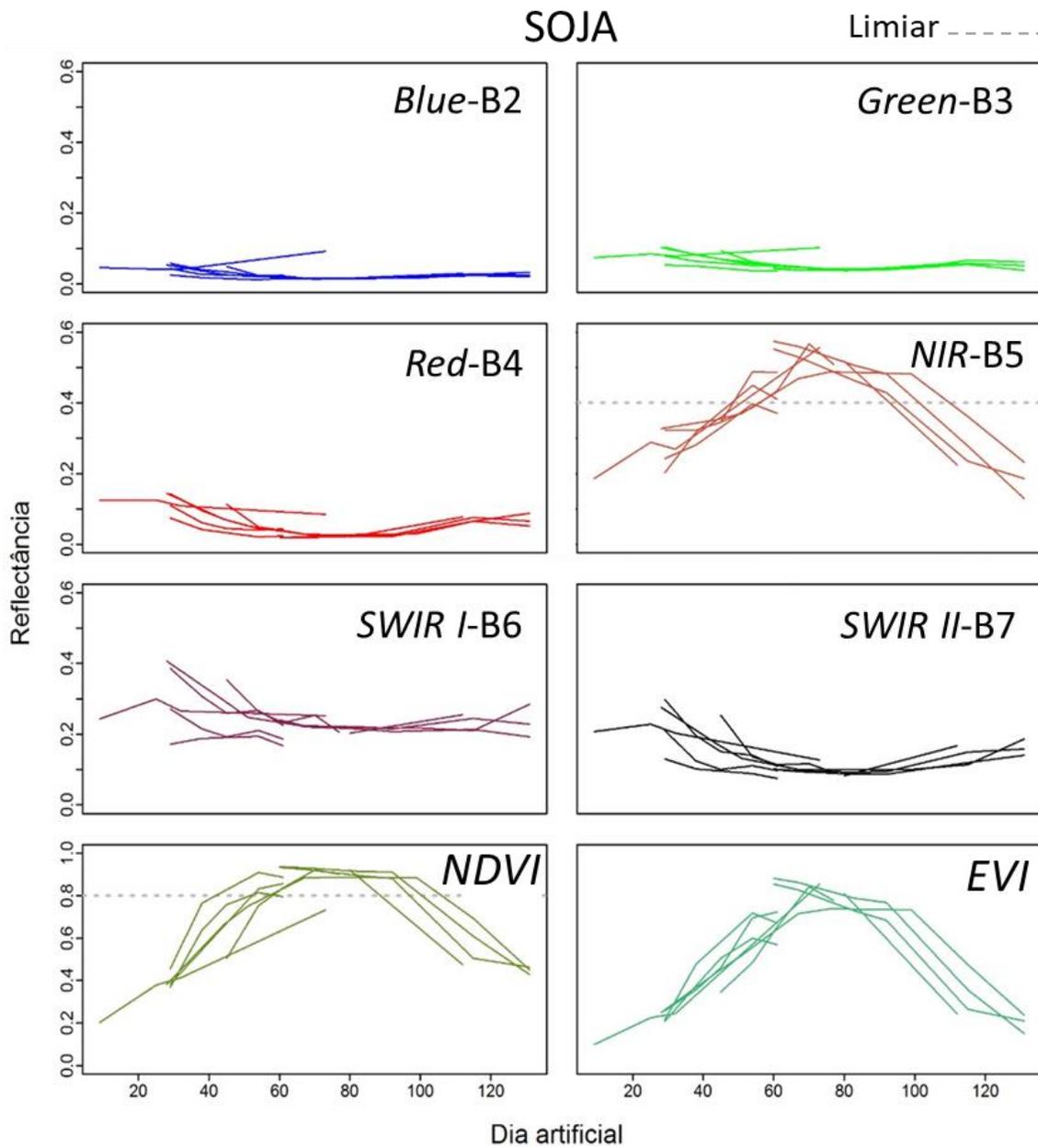
Em relação aos IVs se percebe maiores semelhanças entre as curvas de NDVI das culturas anuais (i.e., milho e soja) (Figura 5.1 e 5.2, respectivamente), com valores superiores a 0,8 durante o período central de máximo desenvolvimento, enquanto que a cana-de-açúcar apresenta, de modo geral, valores menores. Esse padrão também é observado nos perfis do EVI.

Figura 5.1. Perfil espectro-temporal, por banda e por IV, dos 30 talhões de milho.



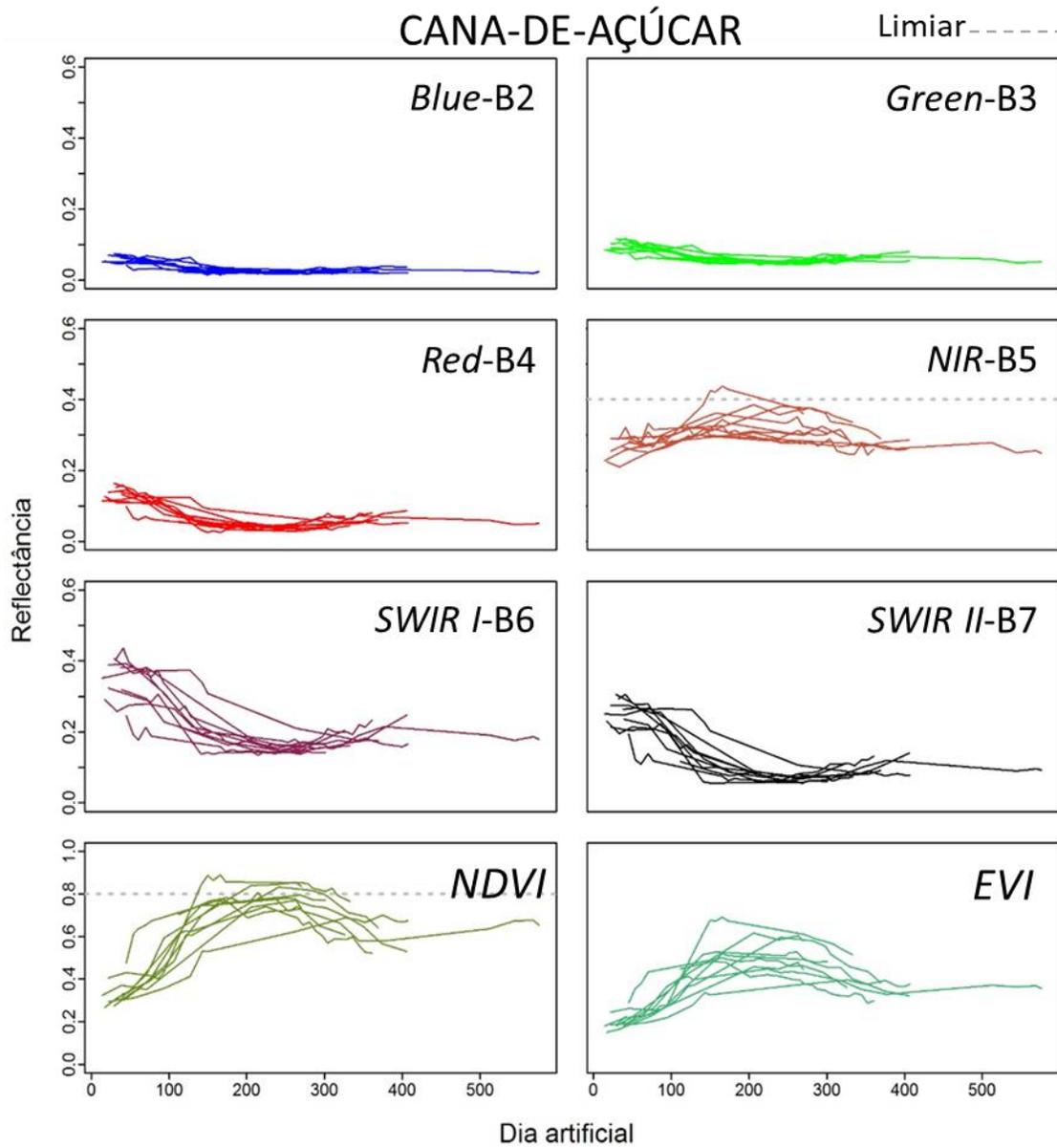
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.2. Perfil espectro-temporal, por banda e por IV, de oito talhões de soja.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.3. Perfil espectro-temporal, por banda e por IV, de nove talhões de cana-de-açúcar.



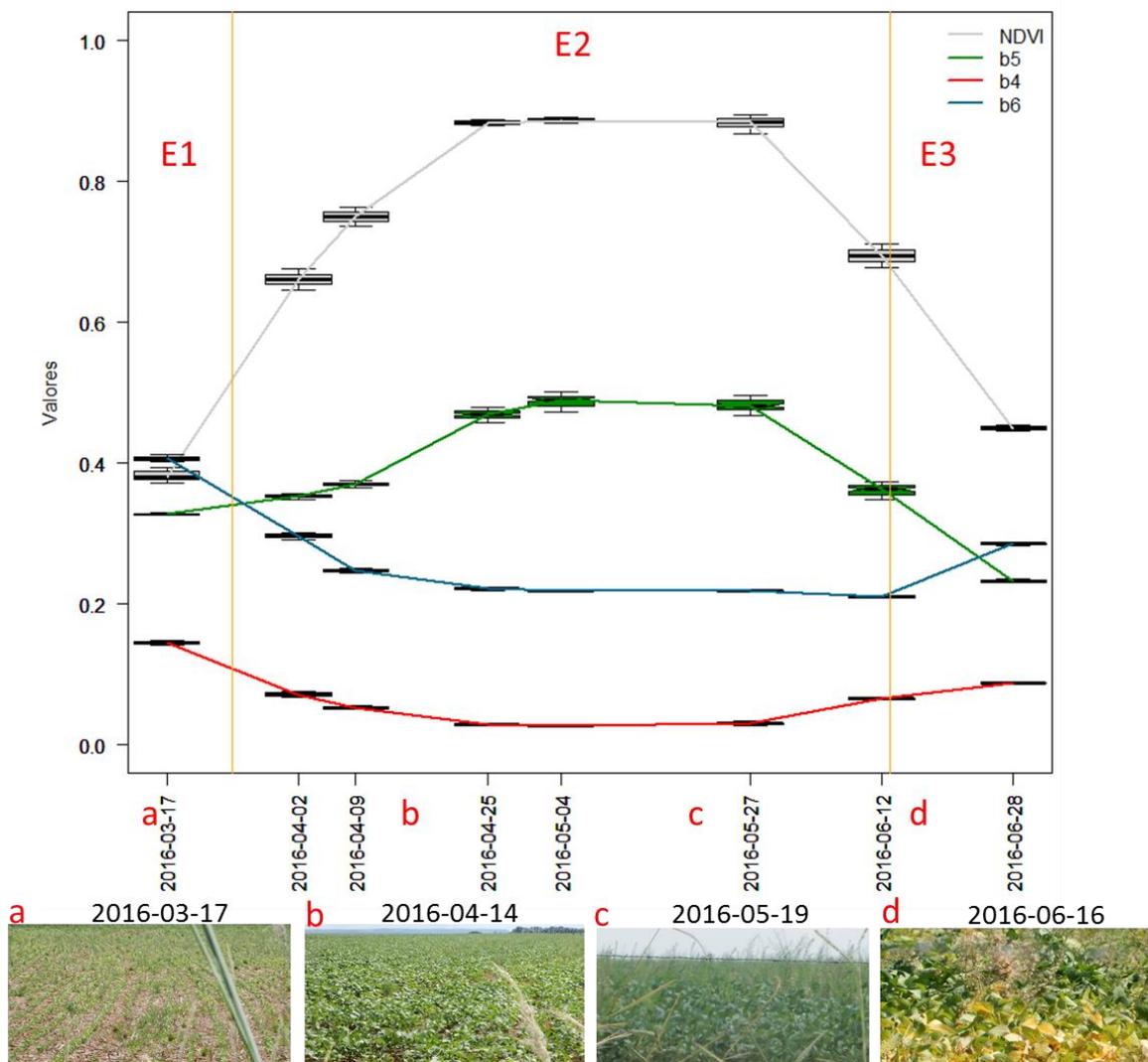
Fonte: Produção do autor.

Para um melhor entendimento da relação entre o desenvolvimento das culturas agrícolas no campo e os perfis apresentados acima, na Figura 5.4 é apresentado

um exemplo de perfil espectro-temporal (bandas B4, B5 e B6 e NDVI) de um talhão de soja cultivado na safrinha de 2016, junto com as fotos da cultura no campo. Esse perfil foi construído com base nos 101 valores extraídos de cada talhão.

Conforme esperado, durante a fase inicial de desenvolvimento da planta (2016-09-17), as bandas B4 (*Red*) e B6 (SWIR I) apresentam valores mais elevados devido à presença de matéria seca da cultura anterior (plantio direto). Com o avançar do desenvolvimento vegetativo da soja, e conseqüentemente o aumento do IAF e recobrimento do espaço entre as fileiras de plantio pelo dossel vegetal, a diminuição nos valores de reflectância destas bandas é verificado, sendo intensificando próximo à data 2016-05-04 (E2 - máximo desenvolvimento vegetativo). O contrário ocorre com a banda B5 (NIR) e com o IV NDVI. Esses apresentam valores menores no início do ciclo vegetativo. Porém, um aumento ao longo do desenvolvimento da planta é verificado, seguido de uma nova diminuição próxima ao fim do ciclo da cultura (E3). O aumento dos valores das bandas B4 (*Red*) e B6 (SWIR I), e a diminuição dos valores da banda B5 (NIR) e do NDVI próximo ao fim do ciclo da soja, estão relacionados à fase de senescência da planta, a qual apresenta uma diminuição na concentração de clorofila e de água no tecido vegetal.

Figura 5.4. Perfil temporal das bandas B4, B5 e B6 do OLI, e NDVI para um talhão cultivado com soja (Id 33) durante a safra de 2016. As linhas verticais laranjas indicam a divisão dos estádios de desenvolvimento (E1, E2 e E3).



## 5.2 Análise interespecífica

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes às análises interespecíficas, ou seja, análise dos perfis espectro-temporais entre as três culturas, com base em: i) seis bandas espectrais (B2, B3, B4, B5, B6 e B7), ii) bandas B4 (*Red*), B5 (NIR) e B6 (SWIR I), iii) NDVI e iv) EVI.

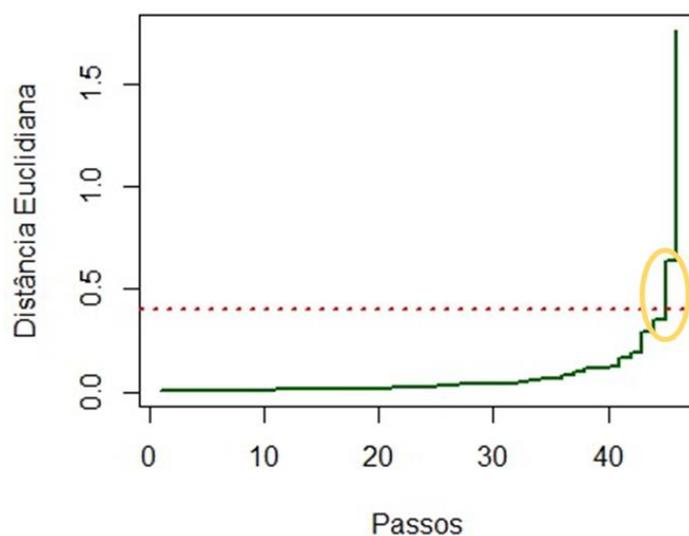
### 5.2.1 Análise baseada em 6 bandas espectrais

Os resultados da análise interespecífica consistem em dendrogramas que apresentam a formação de *clusters*, de acordo com a similaridade entre os valores espectrais dos talhões. Nas discussões feitas a seguir, serão utilizados os termos *cluster* de cana, *cluster* de soja e *cluster* de milho para designar os agrupamentos que são dominados pelos talhões das respectivas culturas.

A identificação dos talhões seguiu o seguinte padrão, “cultura\_id\_safrinha”. Por exemplo, o rótulo m\_45\_s1415 representa um talhão de milho (m), cujo id é 45 e que foi cultivado na safra 2014/15. As letras “c”, “s” e “m” utilizadas como prefixo representam cana, soja e milho, respectivamente. As safras são representadas por “s1415” e “s1516” e as safrinhas por “s15” e “s16”.

O limiar para formação dos *clusters* das classes de milho, soja e cana, foi definido com base no gráfico de sequência de agrupamentos (Figura 5.5). Esse gráfico representa a distância euclidiana utilizada para a geração de cada agrupamento da análise.

Figura 5.5. Sequência de agrupamentos de acordo com a distância euclidiana nas seis dimensões (bandas) analisadas. O platô vertical é indicado pela elipse amarela.

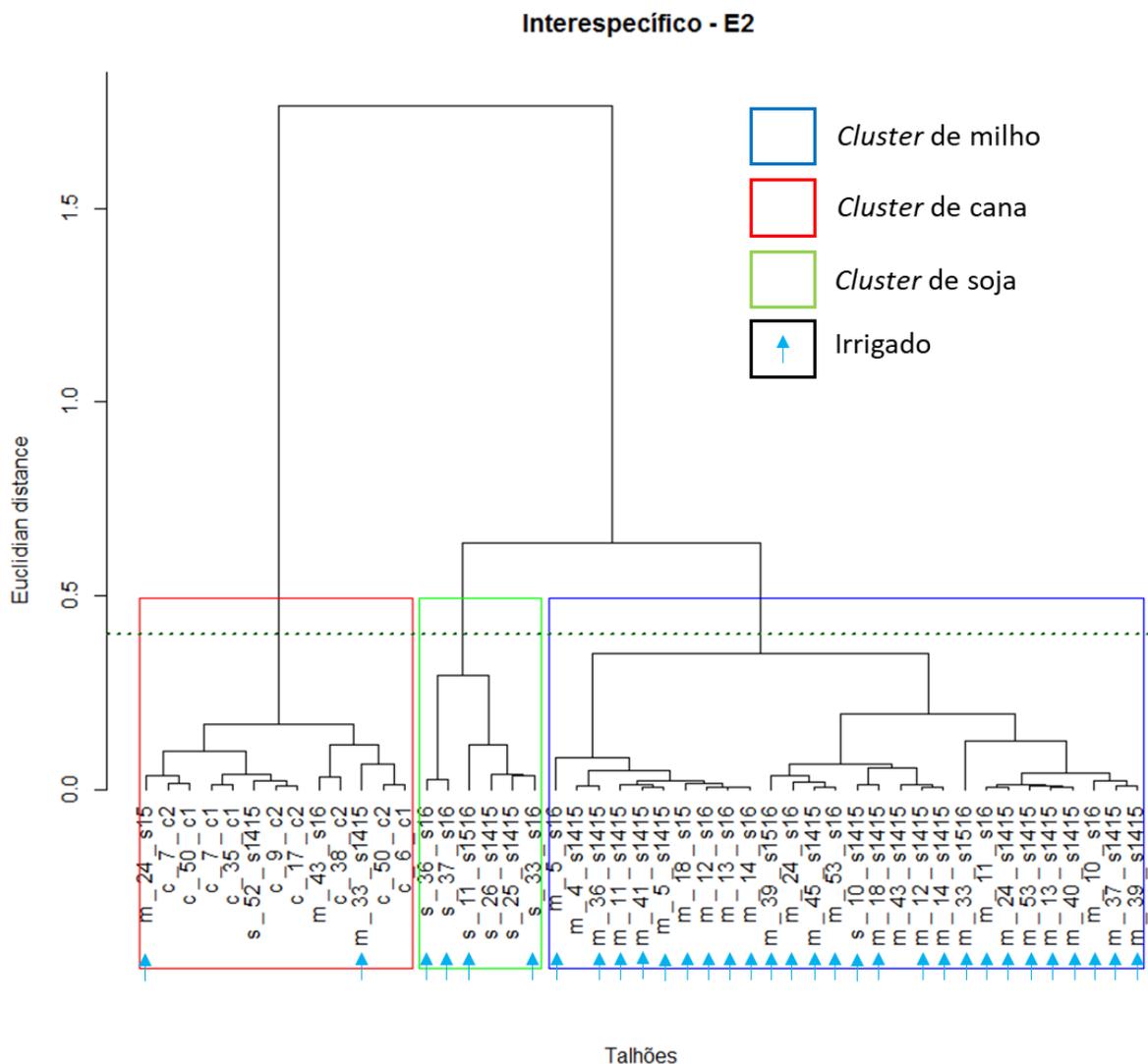


Fonte: Produção do autor.

A existência de um platô no sentido vertical (Figura 5.5) indica a distância que pode ser definida como limiar para os agrupamentos, uma vez que os agrupamentos realizados posteriormente a esse platô são menos similares (Silva, 2007). A distância euclidiana utilizada para o agrupamento se refere à distância presente em um ambiente com seis dimensões, sendo que estas dimensões são representadas pelas seis bandas do sensor OLI/Landsat-8 utilizadas nesse estudo. Neste trabalho, foi estabelecido como limiar a distância 0,4, devido a existência do referido platô vertical.

Na Figura 5.6 é apresentado o resultado da análise de agrupamento baseada nos valores médios do E2 de cada talhão, com base nas seis bandas OLI (B2, B3, B4, B5 e B6). Foram utilizados nesta análise 30 talhões de milho, 8 talhões de soja e 9 talhões de cana-de-açúcar. Nesta análise, verifica-se que existe uma tendência de agrupamento entre talhões da mesma cultura, independentemente da presença ou não de sistemas de irrigação. Entretanto, algumas confusões são encontradas.

Figura 5.6. Dendrograma da análise interespecífica com todos os talhões de soja, milho e cana-de-açúcar, com base em seis bandas OLI (B2 a B7).



Fonte: Produção do autor.

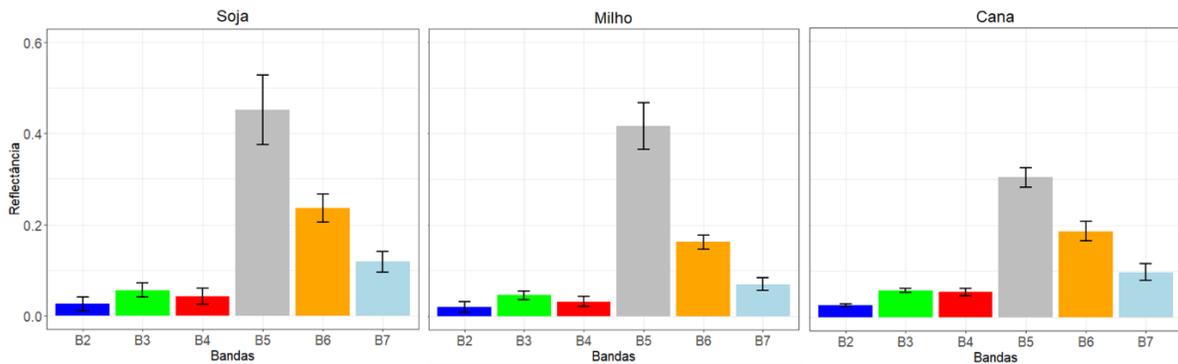
No *cluster* destacado pelo retângulo vermelho na Figura 5.6, que possui predominância de talhões de cana (todos os 9 talhões analisados), foram agrupados erroneamente 3 talhões de milho e 1 de soja. No *cluster* destacado pelo retângulo azul, 1 talhão de soja foi agrupado com 27 talhões de milho. Isso significa que a média espectro-temporal destes talhões apresentaram distâncias euclidianas próximas quando consideradas as 6 dimensões (bandas) analisadas. No *cluster* representado pelo retângulo verde, 6 dos 8 talhões de soja foram agrupados juntos.

A distância euclidiana verificada entre os grupos formados é outro elemento interessante de ser destacado. A cana e o milho, apesar de serem culturas da mesma família (*Poaceae*) e apresentarem estruturas de dossel mais semelhantes quando comparadas com a soja, foram agrupadas apenas nos últimos valores de distância euclidiana (~1,7). Este valor é mais que o dobro do valor da distância (0,7) em que ocorre a união do *cluster* de milho com o *cluster* de soja.

A Figura 5.7 destaca as diferenças espectrais entre as três culturas analisadas, o que explica a tendência de formação de *clusters* de acordo com o tipo de cultura. Os gráficos correspondem à média dos valores médios do estágio E2 de cada talhão, bem como o desvio padrão destes. Verifica-se que nas três culturas, as maiores diferenças estão presentes nas bandas B5, B6 e B7 (NIR, SWIR I e SWIR II, respectivamente). A soja (dossel planófilo) apresenta valores maiores nestas bandas quando comparada com o milho e a cana-de-açúcar (ambas de dossel erectófilo), porém ao comparar o milho com a cana-de-açúcar verifica-se que o milho apresenta valores menores nas bandas B6 e B7 e maior na banda B5. Essas observações estão em consonância com as análises dos perfis espectrais apresentadas na seção 5.1.

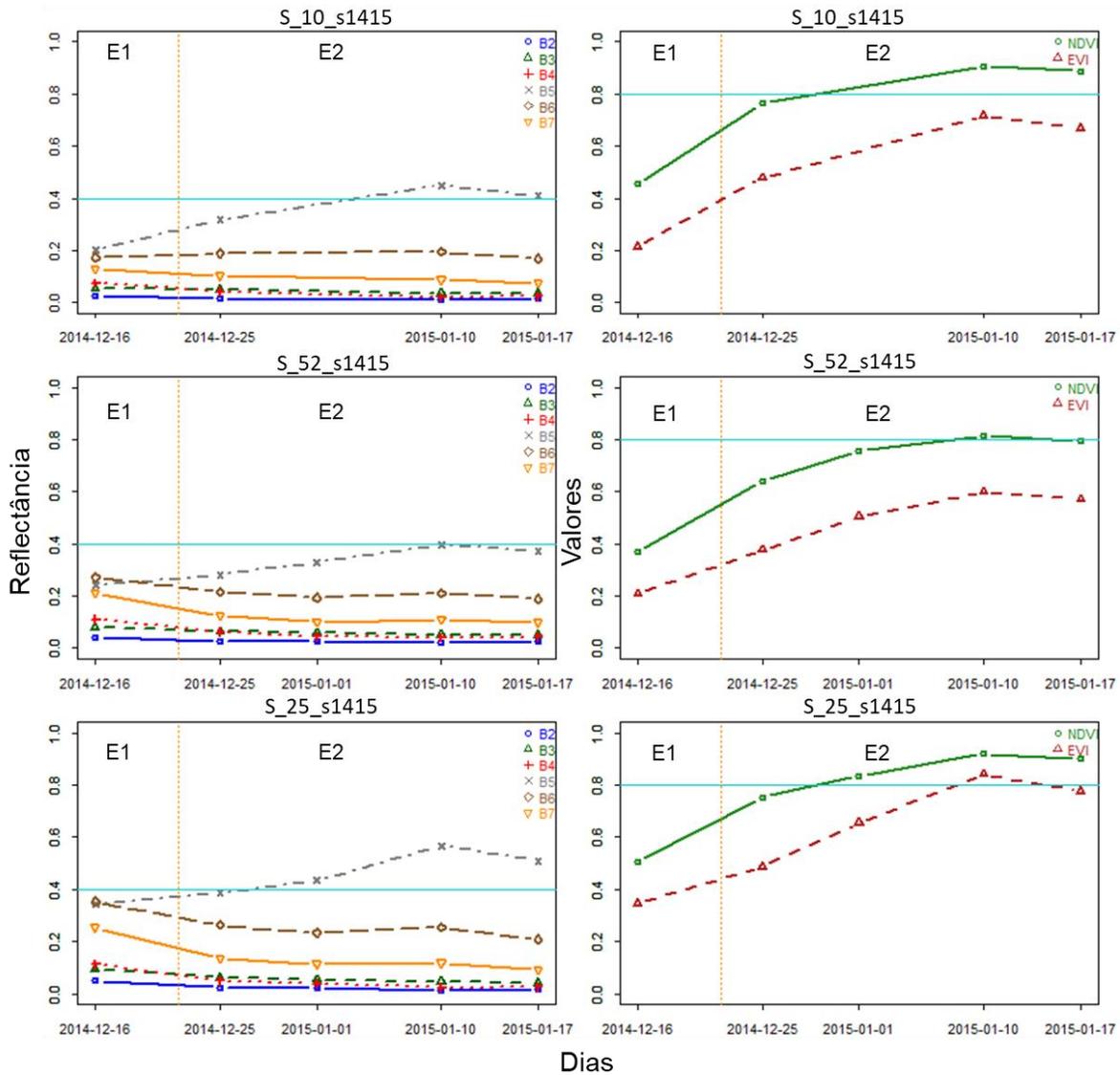
Além disso, o limiar (0,4) definido na seção 5.1 para a banda B5 é compatível com os valores encontrados para esta banda na Figura 5.7. De modo geral, a maioria dos talhões de soja apresentaram valores de reflectância superiores a 0,4, enquanto que os talhões de milho permaneceram com valores próximos a 0,4 e os talhões de cana apresentaram valores abaixo desse limiar. Como mencionado anteriormente, esse limiar será utilizado para explicar os erros de agrupamentos ocorridos na análise interespecífica.

Figura 5.7. Distribuição da média e os respectivos desvios padrão dos valores médios do estádio E2 de cada cultura e de cada banda OLI.



Ao analisar os perfis-espectro temporais dos talhões que foram erroneamente agrupados, algumas observações podem ser destacadas como motivos para estas confusões. Na Figura 5.8 é apresentado o perfil dos talhões s\_10 e s\_52, ambos cultivados com soja na safra 2014/15 e erroneamente agrupados no cluster de cana. Observando os respectivos perfis é possível identificar que estes possuem semelhanças com os perfis de cana apresentados na Figura 5.3, principalmente ao comparar a banda B5. Os valores desta banda estão próximos ao limiar de 0,4, enquanto que, de modo geral, os talhões de soja apresentam valores superiores (Figura 5.2), como ilustrado pelo talhão de s\_25\_s1415 (Figura 5.8).

Figura 5.8. Perfil espectro-temporal das bandas e dos índices dos talhões de soja Id 10, Id 52 e Id 25, cultivados na safra 14/15. Os limiares adotados (linhas horizontais azuis claras) de 0.4 e 0.8 foram estabelecidos com base nos perfis espectro-temporais. A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2.

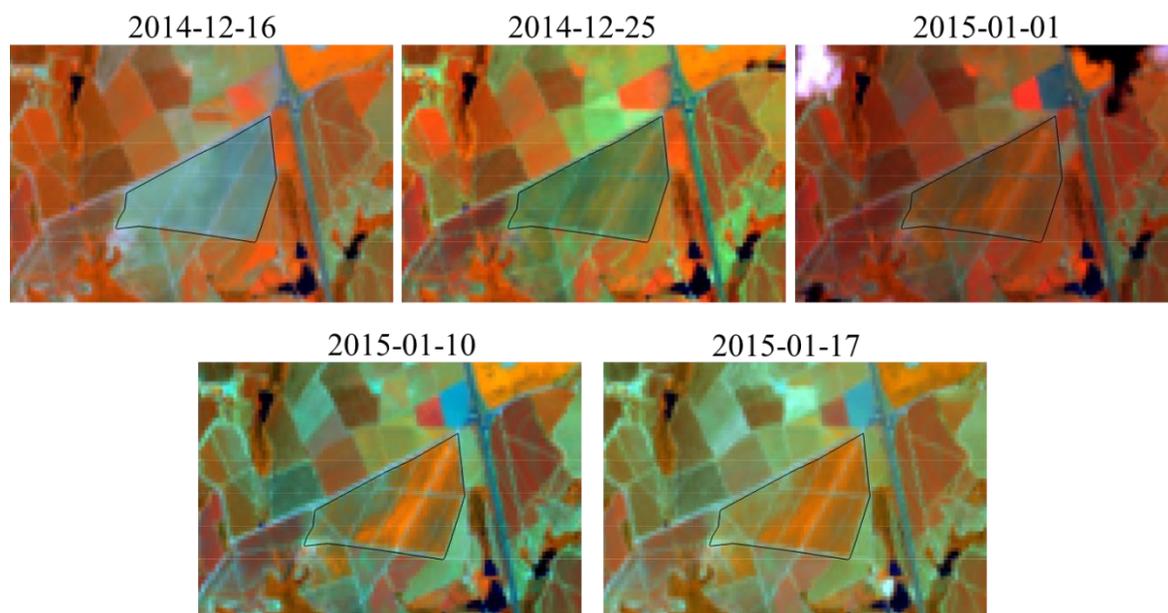


Fonte: Produção do autor

Com base na análise visual da série temporal de imagens OLI/Landsat-8 do talhão s\_52\_1415 (Figura 5.9), verifica-se alta heterogeneidade desse talhão (mais perceptível na imagem do dia 10/01/2015, pela diferença de cores em que o talhão

aparece na composição colorida), indicando áreas de mau desenvolvimento das plantas (partes que não estão em matiz amarela). Outro fato interessante do talhão s\_52\_1415 é que este consiste em uma área de reforma de cana, ou seja, na safra anterior e na posterior, o mesmo foi cultivado com cana. Geralmente, áreas de cana são reformadas por terem sido exploradas intensamente nos anos anteriores, o que pode diminuir a fertilidade e alterar a estrutura do solo, por exemplo. Além disso, este talhão foi cultivado sem a prática de irrigação, sendo necessário destacar que o período de 2014/2015 foi mais seco que o de 2015/2016 (Agritempo, 2018). Esses fatos podem ter sido responsáveis pelo desenvolvimento vegetativo inferior das plantas, suposição baseada na interpretação visual das imagens (Figura 5.8) que foi confirmada pelos dados de campo. Esse desenvolvimento inferior é indicado também pelos valores dos IVs (Figura 5.8), os quais foram inferiores a maioria dos talhões de soja (Figura 5.3).

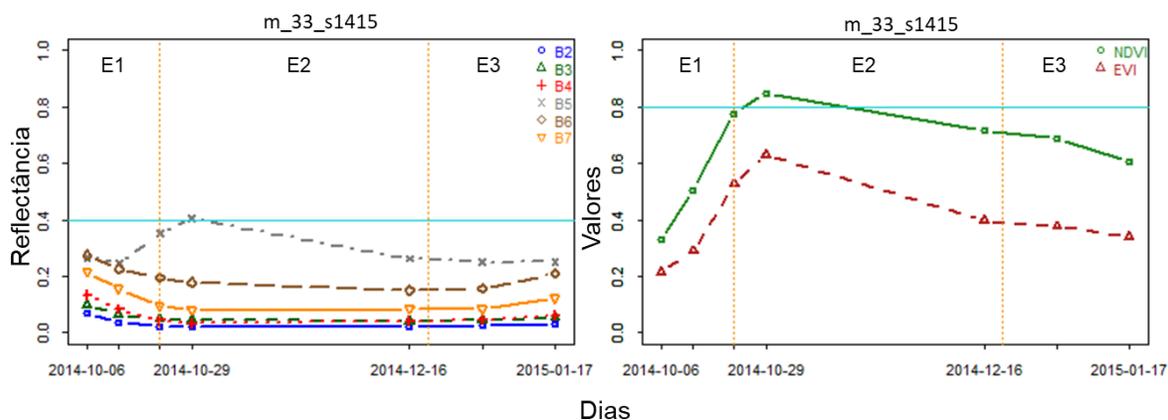
Figura 5.9. Talhão de soja cultivado durante a safra 2014/15 (s\_52\_s1415) e que foi agrupado na classe que predomina talhões cultivados com cana-de-açúcar (cluster de cana).



Fonte: Produção do autor.

O perfil espectro-temporal do talhão de milho m\_33\_s1415, que também foi erroneamente agrupado no *cluster* da cana, é apresentado na Figura 5.10. A justificativa para esta confusão é o fato deste talhão possuir apenas duas imagens disponíveis na época de desenvolvimento fenológico E2, sendo essas do início e do término deste estágio. A ausência de imagens próximas ao centro do período de máximo desenvolvimento do milho prejudicou o correto agrupamento do talhão, uma vez que diminuiu o valor da média de reflectância deste estágio.

Figura 5.10. Perfil espectro-temporal do talhão de milho Id 33 cultivado durante a safra 2014/15. Os limiares adotados (linhas horizontais azuis claras) de 0.4 e 0.8 foram estabelecidos com base nos perfis espectro-temporais. A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2.

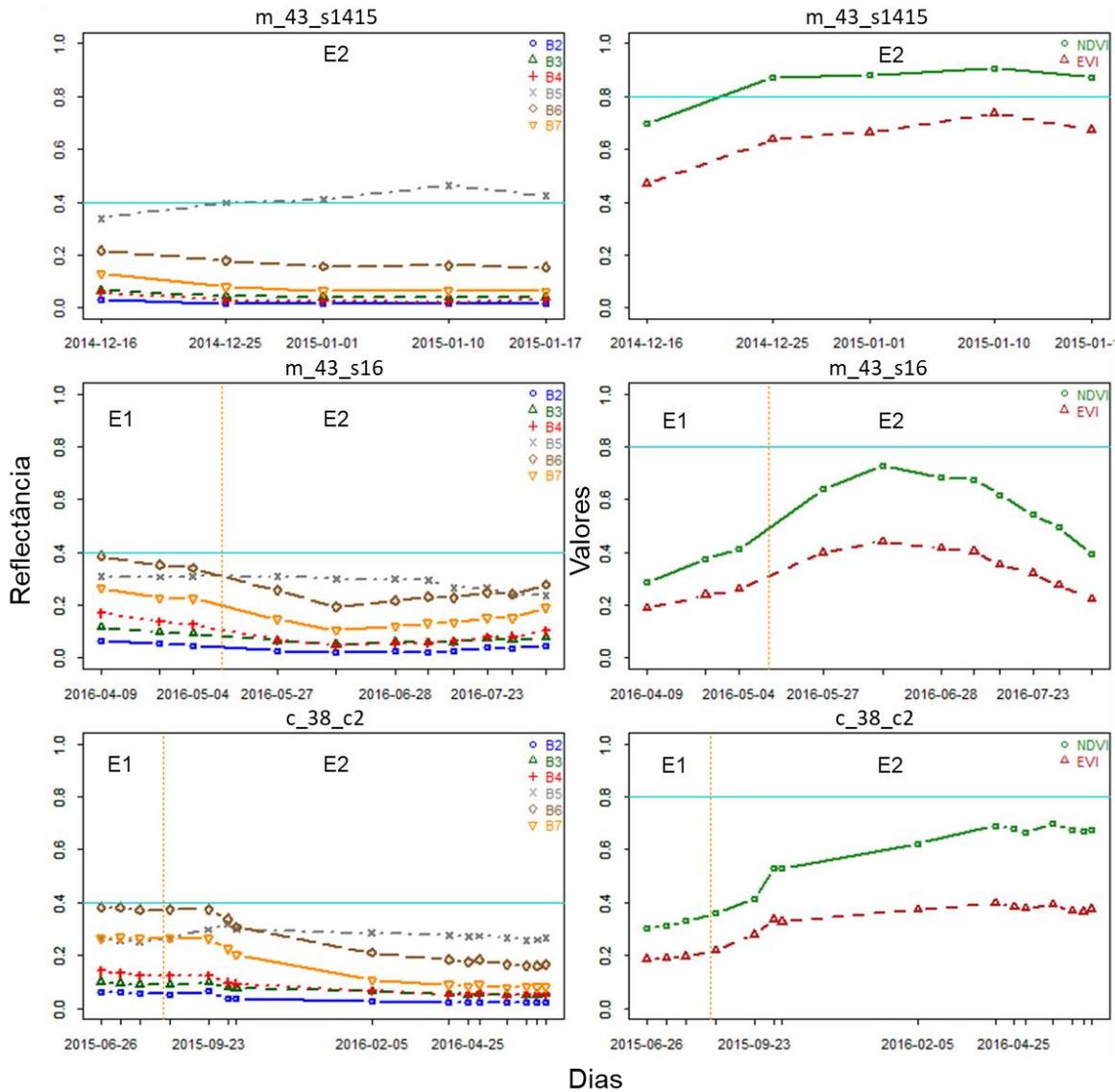


Fonte: Produção do autor.

O talhão de milho m\_43\_s16, que foi erroneamente agrupado no *cluster* de cana, apresenta um desenvolvimento vegetativo inferior em relação aos outros talhões de milho. Esse desenvolvimento inferior pode ser inferido ao comparar os valores espectrais das bandas, como a B5 (Figura 5.11), e dos índices de vegetação, desse talhão com o m\_43\_s1415 (mesmo talhão cultivado durante primeira safra). Por se tratar de uma área que não é artificialmente irrigada, o cultivo durante o período de safrinha pode apresentar um desenvolvimento menos vigoroso por causa da menor disponibilidade de água, (SOBENKO et al., 2017). Isso é evidenciado pelas diferenças expressivas encontradas ao analisar os perfis (Figura 5.11) das bandas

6 e 7 (B6 – B7) destes talhões (m\_43\_s16 e m\_43\_s1415), sendo corroborado pelas anotações de campo.

Figura 5.11. Perfil espectro-temporal do talhão de milho (Id 43) cultivado durante a safra 2014/15 e safra 2016, e do talhão de cana (Id 38) cultivado durante seu segundo ciclo (c2). A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2.



Fonte: Produção do autor.

As bandas B6 e B7 se localizam no SWIR, região do espectro que é sensível à quantidade de água presente no tecido vegetal (CHEN et al., 2005). Comparando

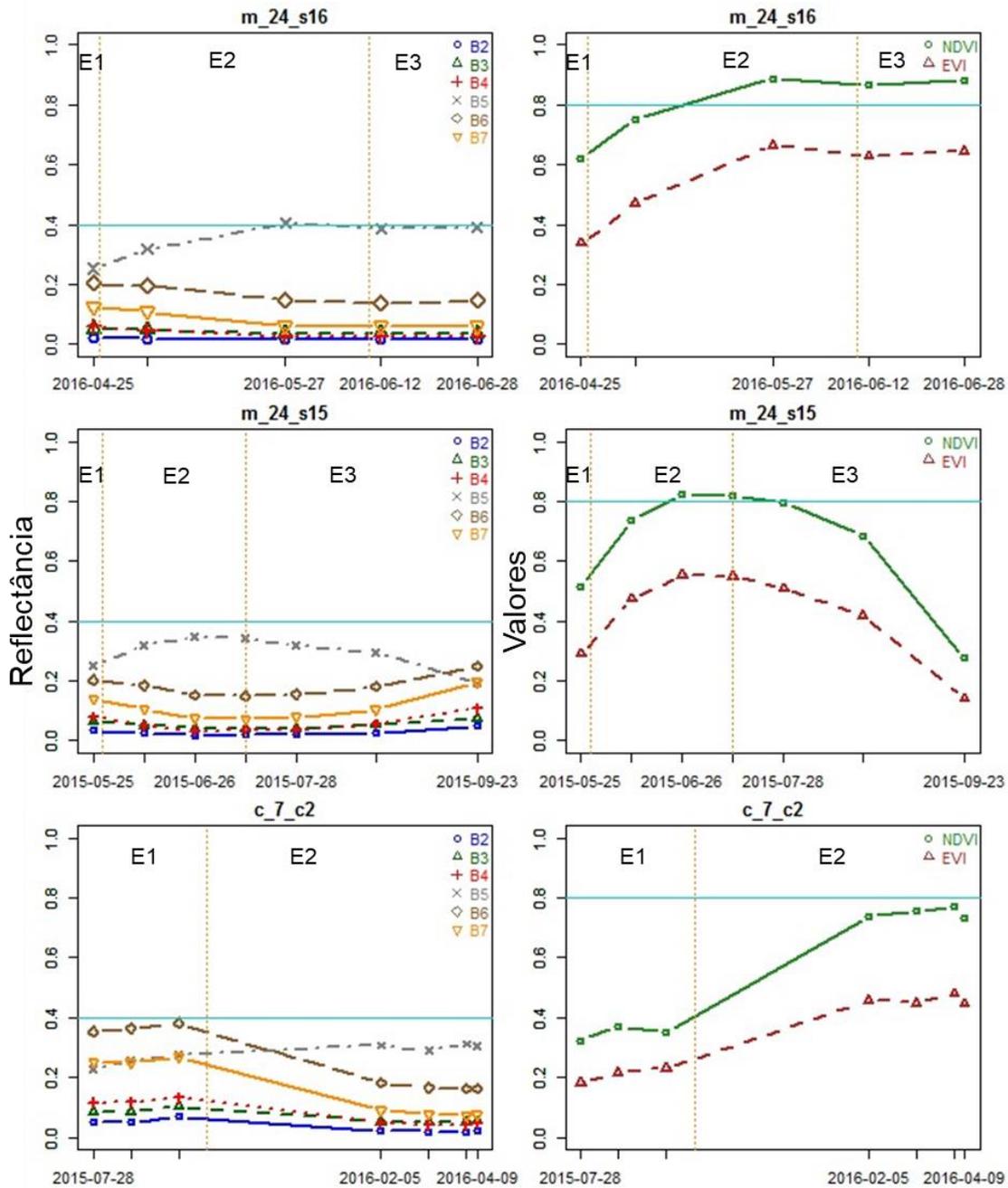
os perfis espectro-temporais dessas bandas entre os períodos de safra 2014/15 (época de chuva) e safrinha 2016 (época de seca), percebe-se que os valores de reflectância durante a safrinha são maiores, possivelmente ocasionados por uma menor disponibilidade de água.

Como discutido anteriormente, geralmente uma menor disponibilidade hídrica durante a safrinha é verificada, o que pode comprometer o cultivo em regime de sequeiro. Na análise de agrupamento da Figura 5.6, o talhão m\_10\_s16 também foi cultivado durante a safrinha de 2016 e está corretamente agrupado no *cluster* de milho, diferentemente do talhão m\_43\_s16. Uma das explicações para este fato é que o talhão m\_10\_s16 possui sistema de irrigação, acarretando em maior disponibilidade hídrica, enquanto que o plantio do talhão m\_43\_s16 ocorreu em abril de 2016, período caracterizado pela menor disponibilidade hídrica.

A Figura 5.10 apresenta também o perfil espectro-temporal do talhão de cana-de-açúcar c\_38\_c2, com o qual o talhão de milho m\_43\_s16 foi agrupado. É possível identificar maiores semelhanças entre o perfil desses talhões (c\_38\_c2 e m\_43\_s16), quando comparados com o perfil do mesmo talhão de milho, mas cultivado durante a safra 2014/15.

O perfil do talhão m\_24\_s15, que também foi incluído erroneamente no *cluster* da cana-de-açúcar, é ilustrado na Figura 5.12, juntamente com os perfis dos talhões c\_7\_c2 (agrupado no cluster da cana), e do talhão m\_24\_s16 (agrupado no cluster de milho). Ao analisá-los, percebe-se que o talhão m\_24\_s15 apresentou valores semelhantes ao talhão c\_7\_c2, principalmente na banda B5 durante o estágio E2. Essa similaridade de valores não é verificada para o ano de 2016, no qual o talhão m\_24\_s16 apresentou valores superiores ao limiar (0,4) para a banda B5, por exemplo. Assim, apesar de não constar nos dados de campo, um possível desenvolvimento vegetativo inferior do talhão m\_24\_s15 pode ter ocasionado essa confusão.

Figura 5.12. Perfil espectro-temporal do talhão de milho (Id 24) cultivado durante a safrinha 2015 e safrinha 2016, e do talhão de cana (Id 7) cultivado durante seu segundo ciclo (c2). A linha vertical laranja indica a separação entre os estádios E1 e E2.

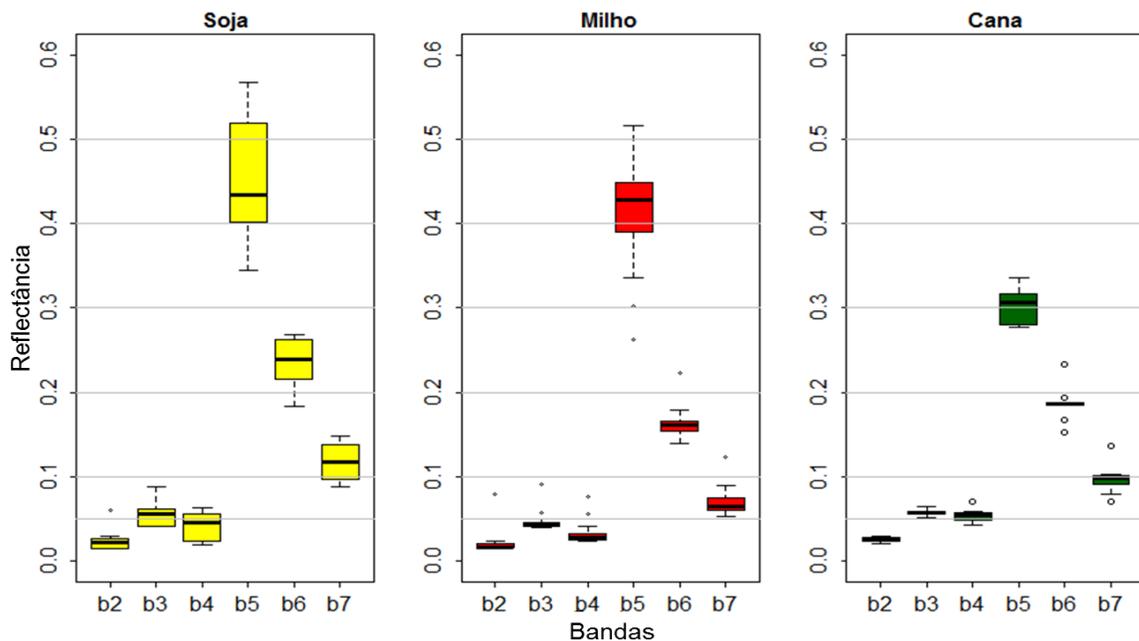


Fonte: Produção do autor.

Uma análise da distribuição dos valores médios do E2, por meio de um gráfico (*boxplot*), também foi executada com o objetivo de identificar quais bandas

espectrais apresentam maiores diferenças (em valores de reflectância) entre as culturas (Figura 5.13), além de auxiliar na compreensão dos agrupamentos da Figura (5.6). De forma geral, levando em consideração o valor da mediana (traço preto dentro das caixas), as bandas do NIR (B5) e do SWIR (B6 e B7) possuem valores de reflectância mais discrepantes entre as culturas, enquanto que as bandas do visível (B2, B3 e B4) possuem uma diferença mais sutil.

Figura 5.13. Variação dos valores médios do E2 de todas as bandas e de todos os talhões para as três culturas analisadas. O traço preto contido nas caixas representa o valor da mediana de cada banda.

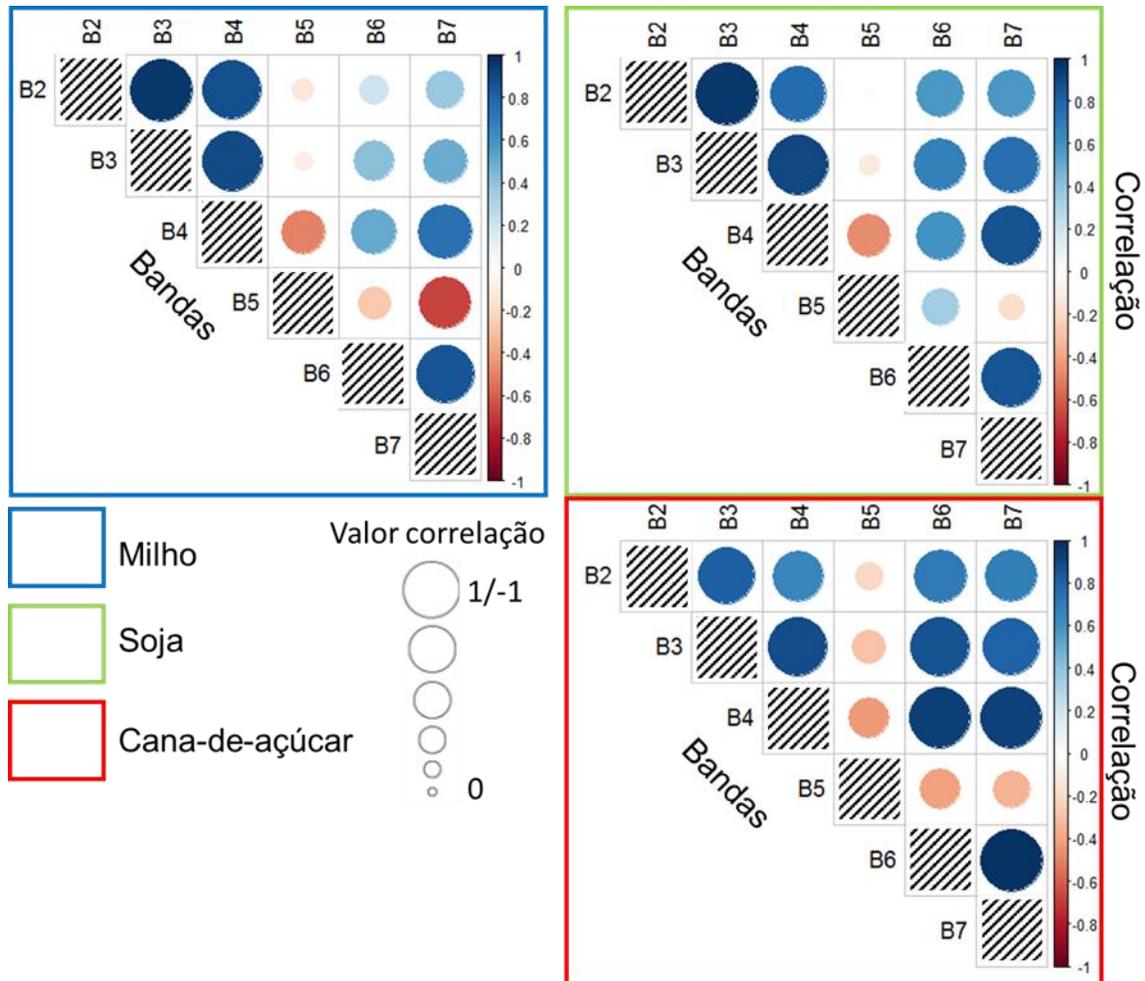


Fonte: Produção do autor.

Além da análise entre as culturas, também foi explorado a correlação (correlação de Pearson) da reflectância média do estágio de desenvolvimento E2 das bandas espectrais entre todos os talhões da mesma cultura (Figura 5.14). Observa-se que a banda do NIR (B5) apresentou as menores correlações, e foi a única banca que apresentou correlação negativa. Comparando os resultados entre as culturas, percebe-se que a correlação entre as bandas do NIR (B5) e SWIR B6 foi positiva para a cultura da soja, mas negativa para o milho e a cana. Interessante também

notar que a correlação mais negativa para a soja foi observada entre as bandas do vermelho (B4) e do NIR (B5), o mesmo para a cana (embora a correlação entre B4-B5 é semelhante à de B5-B6), mas que para o milho a correlação mais negativa ocorreu entre as bandas do NIR (B5) e do SWIR B7.

Figura 5.14. Correlação das bandas espectrais de cada cultura com base no valor médio do E2 de cada talhão.



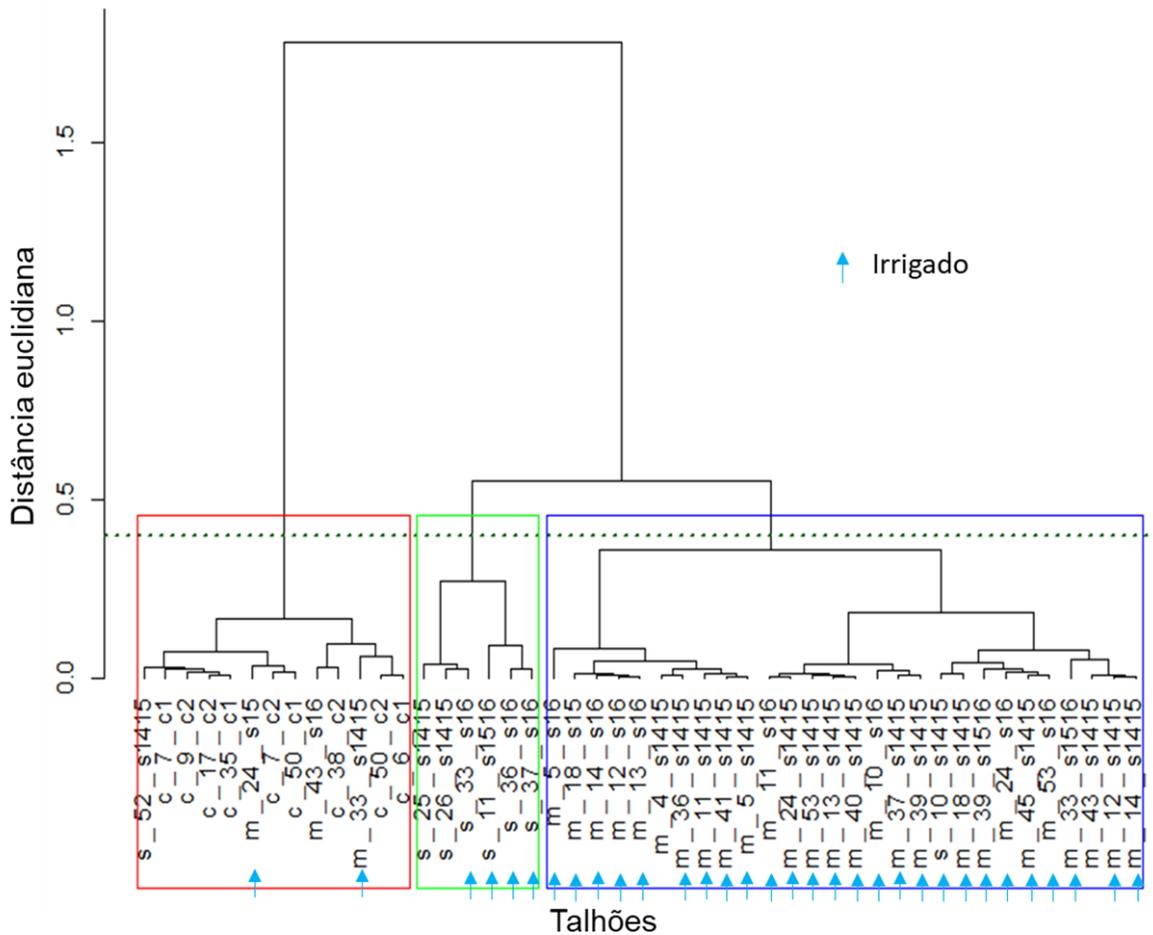
Fonte: Produção do autor.

### **5.2.2 Análise baseada nas bandas espectrais do *Red* (B4), NIR (B5) e SWIR (B6)**

Uma análise de agrupamento (Figura 5.14) foi realizada utilizando as bandas das regiões espectrais do *Red* (B4), NIR (B5) e SWIR (B6). Essas três bandas espectrais foram escolhidas porque são as mais comumente empregadas em estudos agrícolas baseados na interpretação visual de imagens (FORMAGGIO; SANCHES, 2017). O resultado apresentado na análise dos valores médios (Figura 5.7), na análise dos valores da mediana (Figura 5.13) e da análise de correlação (Figura 5.14), justificam a escolha dessas três bandas, pois são as que apresentaram as maiores diferenças entre as culturas analisadas, além de serem menos correlacionadas.

O resultado da análise de agrupamento envolvendo estas três bandas (Figura 5.15) é basicamente igual à análise envolvendo todas as bandas (Figura 5.6). As confusões de agrupamento ocorrem exatamente com os mesmos talhões, as quais foram elucidadas anteriormente.

Figura 5.15. Dendrograma da análise interespecífica com todos os talhões apenas com as bandas *Red* (B4), NIR(B5) e SWIR (B6).



Fonte: Produção do autor.

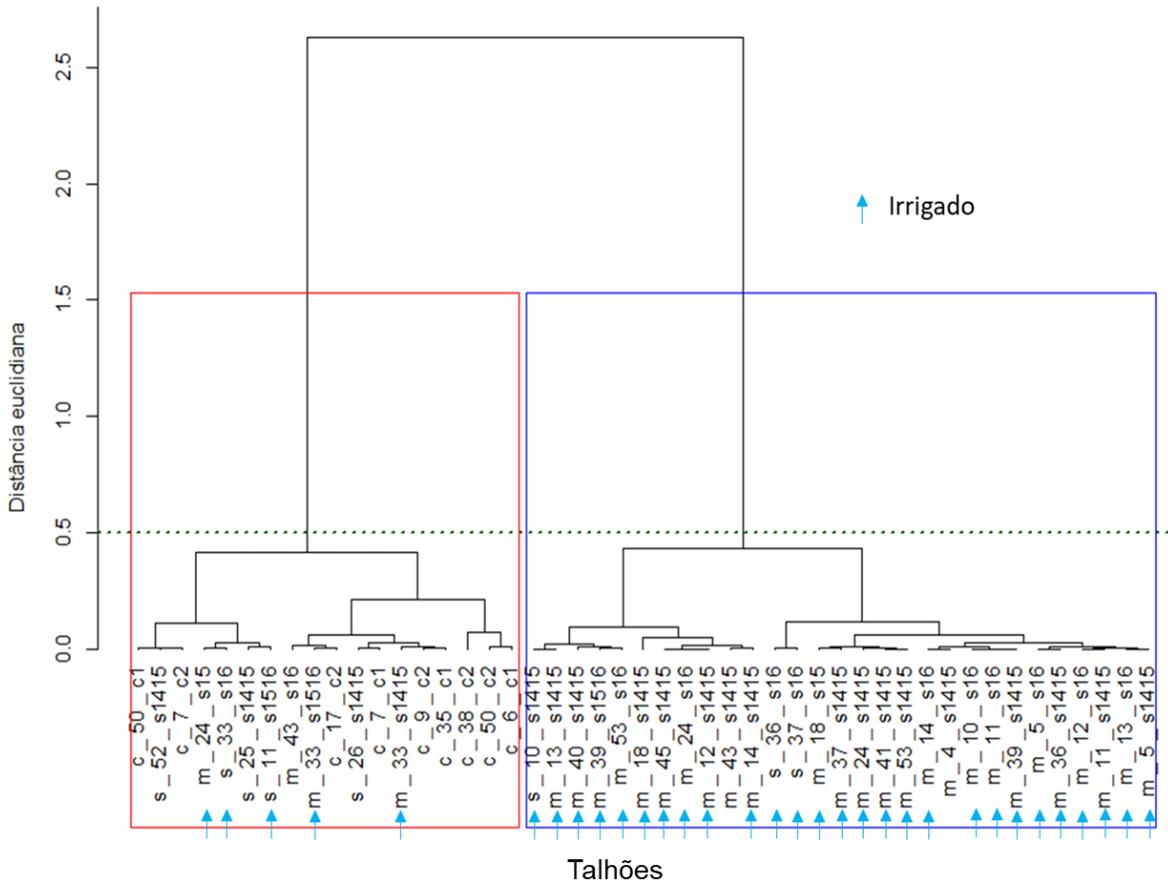
### 5.2.3 Análise baseada no NDVI e EVI

Análises de agrupamento interespecíficas também foram efetuadas com base nos valores dos índices de vegetação NDVI e EVI, gerados a partir do sensor OLI/Landsat-8. Semelhante à análise anterior, o limiar para geração dos clusters foi obtido a partir do gráfico de seqüências de agrupamento.

Os dendrogramas apresentados nas Figuras 5.16 e 5.17 mostram os agrupamentos estabelecidos a partir dos valores médios de NDVI e EVI, para todos os talhões,

respectivamente. O resultado é bastante inferior ao obtido nos agrupamentos considerando as seis bandas. Diversas confusões são observadas, ocorrendo agrupamentos entre milho e soja, milho e cana, soja e cana, em ambas as análises.

Figura 5.16. Dendrograma da análise interespecífica baseada nos valores de NDVI, com todos os talhões.

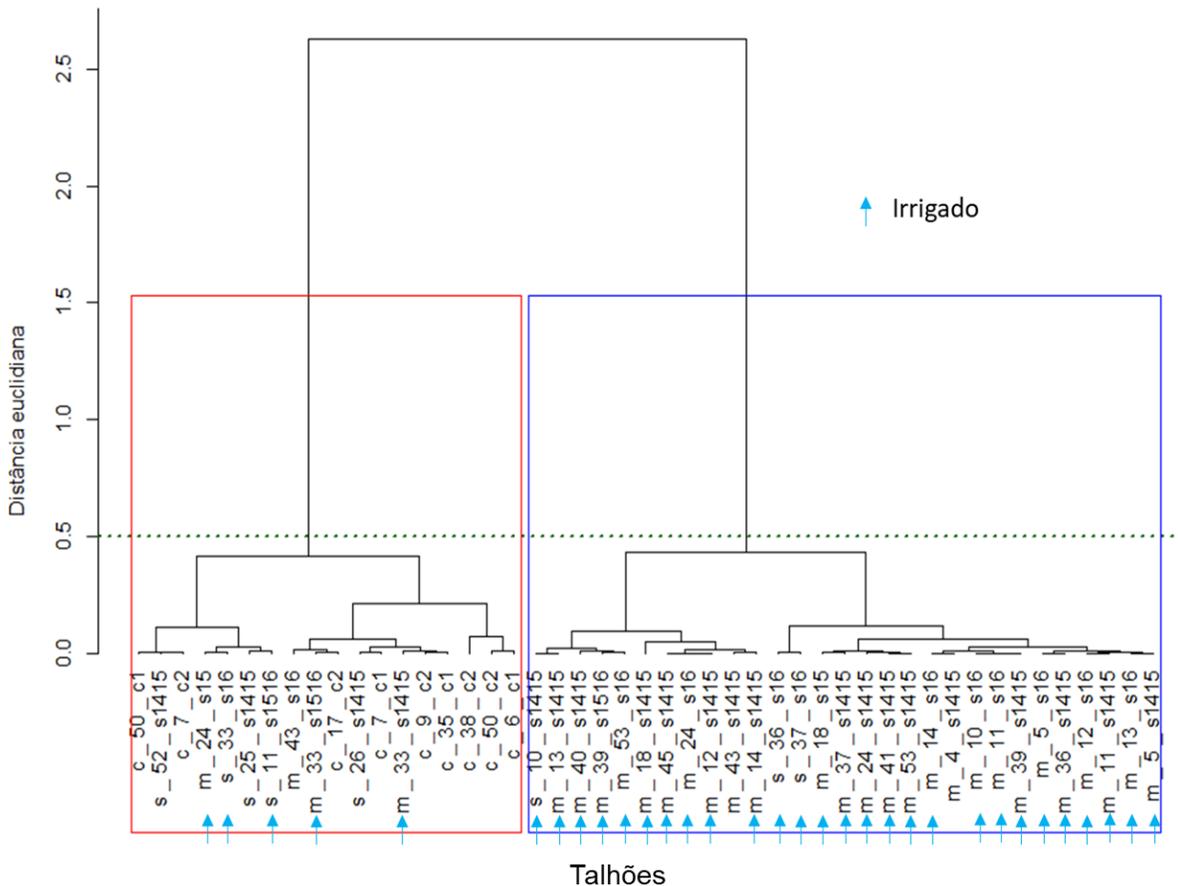


Fonte: Produção do autor.

Na análise baseada no NDVI (Figura 5.16), 4 entre os 8 talhões de soja foram agrupados erroneamente, não permitindo a formação de um *cluster* desta cultura. Uma tendência semelhante aos talhões de soja ocorreu com os talhões de cana, entre os 9 talhões, 4 foram agrupados erroneamente. Os talhões de milho, por apresentarem maior número, formaram um *cluster*, porém 5 talhões dessa cultura foram agrupados inadequadamente com cana ou soja.

Na análise baseada no EVI (Figura 5.17), de modo geral, é possível identificar os mesmos padrões da análise do NDVI, apresentando a diminuição no número de confusões para as culturas da cana e soja, e um aumento para a cultura do milho. Três talhões de cana e 3 de soja foram agrupados equivocadamente, enquanto que 6 talhões de milho foram confundidos com cana ou soja.

Figura 5.17. Dendrograma da análise interespecífica baseada nos valores de EVI, com todos os talhões.

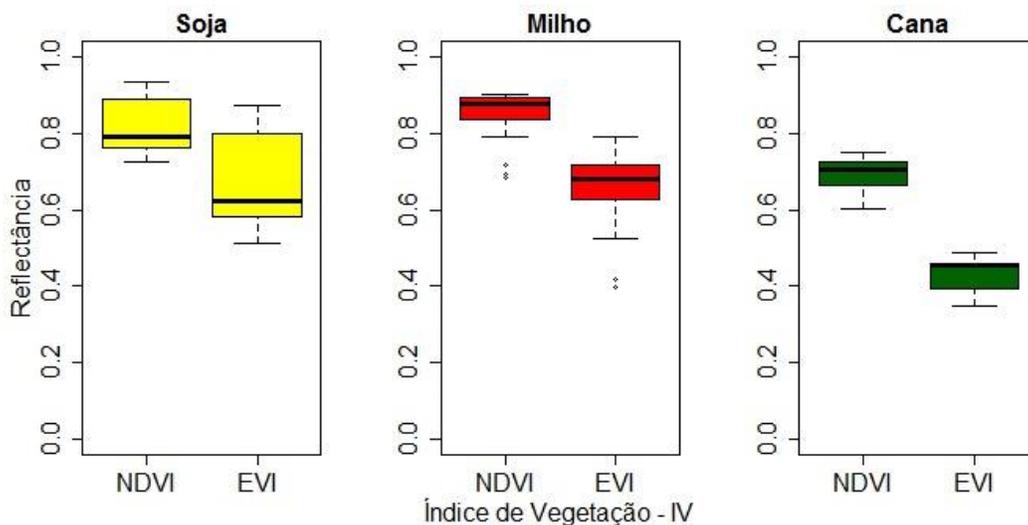


Fonte: Produção do autor.

Nas duas análises dos IVs não se constatou tendência de agrupamento pelos fatores: i) números de imagens, ii) época de plantio e iii) número de imagens disponíveis no estágio E2.

Por meio da análise da Figura 5.18 é possível inferir sobre os motivos das diversas confusões ocorridas nas análises de agrupamentos das Figuras 5.16 e 5.17. A distribuição dos valores do IV NDVI são mais semelhantes entre os talhões soja e milho do que com os talhões de cana. Esse padrão é também verificado nos valores do IV EVI, porém com uma diferença mais acentuada entre a cana e as outras culturas. Tal diferença pode ser o motivo para a tendência de formação de um *cluster* de cana, representado pelo quadrado vermelho na Figura 5.17.

Figura 5.18. Variação dos valores médios do E2 dos IV de todos os talhões para as três culturas analisadas. O traço preto contido nas caixas representa o valor da mediana de cada IV.



Fonte: Produção do autor.

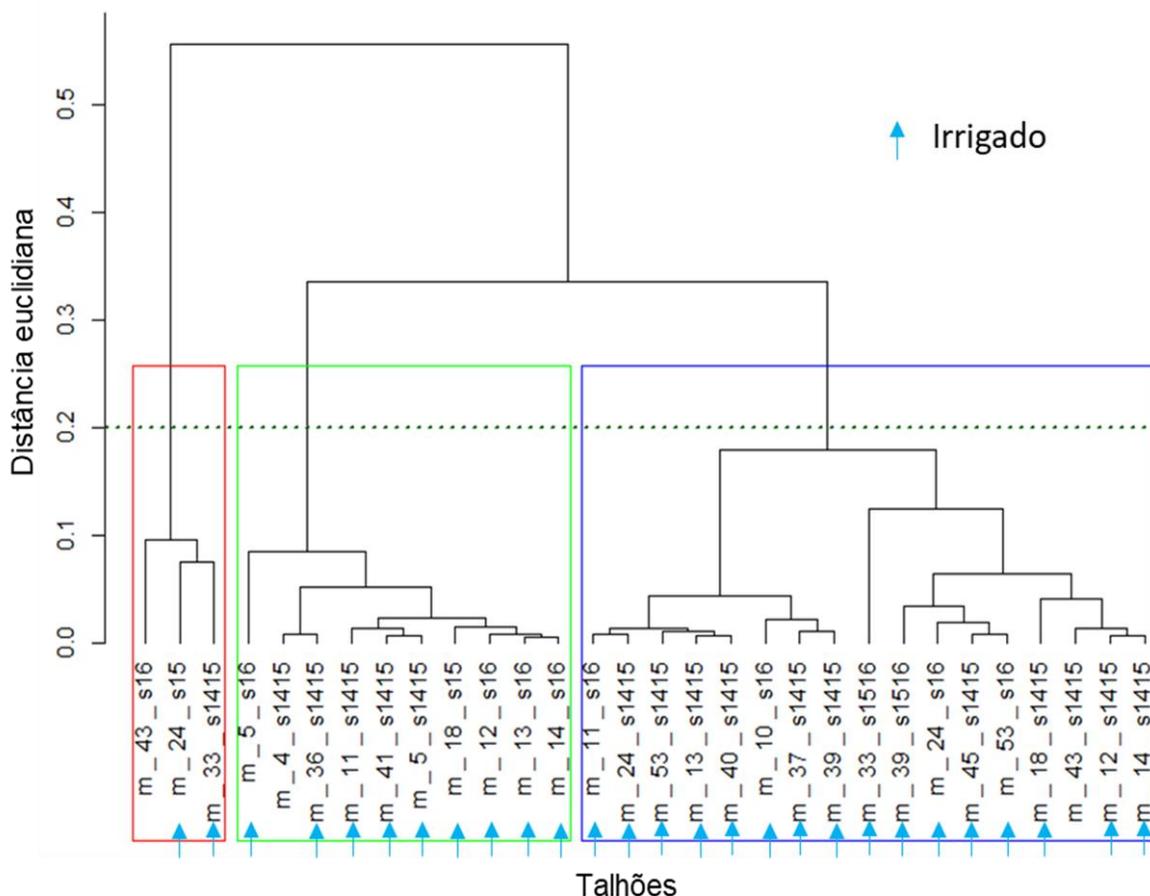
### 5.3 Análise intraespecífica

A seguir serão apresentados os dendrogramas das análises intraespecíficas, ou seja, das análises de agrupamento contemplando apenas talhões cultivados com a mesma cultura. Todas as análises foram realizadas com as seis bandas (B2-B7).

O objetivo desta análise foi verificar a existência de diferenças espectro-temporais da mesma cultura, entre anos de cultivos e sistemas de manejo diferentes (safra, safrinha, irrigado artificialmente e não irrigado artificialmente).

Na Figura 5.19 é apresentado o resultado da análise de agrupamento da cultura do milho (30 talhões) com todas as seis bandas. O limiar de similaridade (0,2), conforme as análises anteriores, foi definido de acordo com o gráfico de sequência de agrupamento.

Figura 5.19. Dendrograma da análise intraespecífica de talhões de milho baseada em todas as bandas.

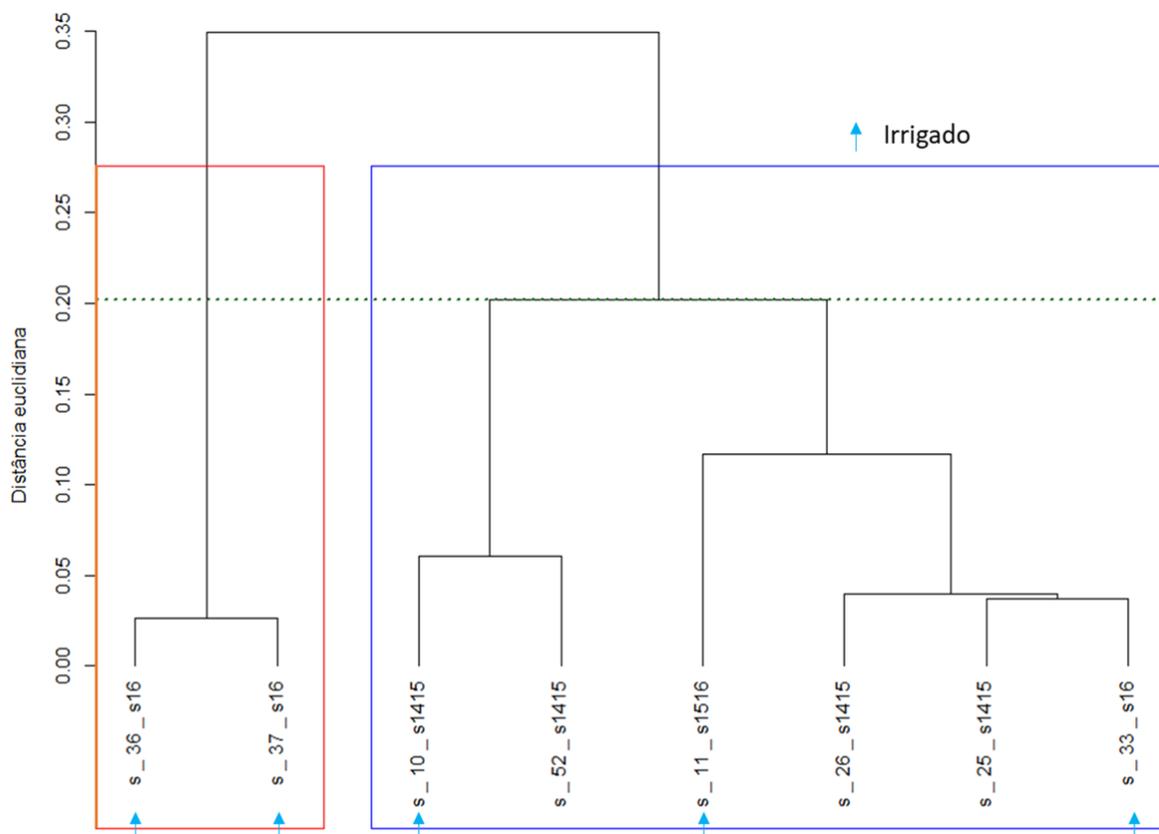


Fonte: Produção do autor.

De modo geral, não se observa uma tendência de formação de clusters de acordo com safra e safrinha (Figura 5.19), apesar da predominância de talhões desta cultura (milho) na safra 1415 (17 talhões de 30). Além disso, um dos *clusters* (destacado por um quadrado vermelho na Figura 5.19) foi formado com os três talhões que foram erroneamente agrupados na análise interespecífica (Figura 5.6).

A Figura 5.20 apresenta o resultado da análise de agrupamento com todas as bandas dos talhões cultivados com soja (8 talhões). Para a cultura da soja percebe-se que existe uma tendência de agrupamento de acordo com a safra ou safrinha, principalmente abaixo do valor 0,15 de distância euclidiana. O número de imagens, bem como os sistemas de manejo (irrigado, sequeiro), não influenciaram os agrupamentos, pois são encontrados talhões com 1 imagem e com 4 imagens, irrigado e não irrigado no mesmo grupo.

Figura 5.20. Dendrograma da análise intraespecífica de talhões de soja baseada em todas as bandas.

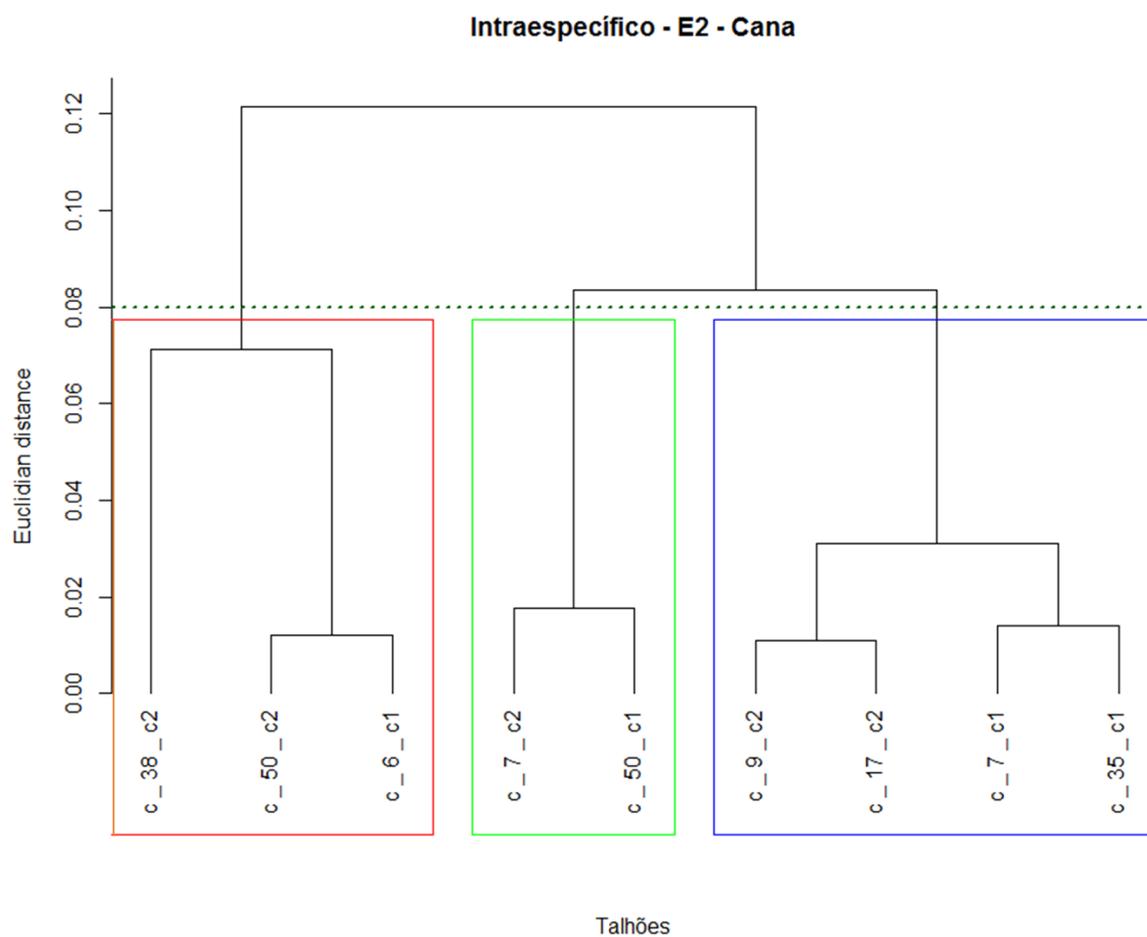


Fonte: Produção do autor.

O dendrograma da Figura 5.21 consiste no resultado do agrupamento dos talhões cultivados com cana-de-açúcar. Dentre os 9 talhões de cana, 5 foram agrupados

independentemente da época de plantio, o que permite inferir que não existem diferenças entre os talhões cultivados em épocas distintas. O número de imagens também não influenciou nos agrupamentos formados, pois, por exemplo, os talhões c\_7\_c1 e c\_35\_c1 possuem 8 e 14 imagens no E2 respectivamente.

Figura 5.21. Dendrograma da análise intraespecífica de talhões de cana baseada em todas as bandas.



Fonte: Produção do autor.

## 6. DISCUSSÃO

A alta frequência de nuvens, que é um dos principais limitantes para o uso de dados de sensoriamento remoto óptico no monitoramento da atividade agrícola (EBERHARDT et al., 2016; WHITCRAFT et al., 2015B; ATZBERGER, 2013), reduziu o número de imagens disponíveis para o estudo, acarretando na defasagem de informação em datas específicas nos perfis espectro-temporais. Apesar da área de estudo se localizar em uma região de sobreposição de duas cenas do sensor OLI, obtendo-se imagens a cada 7-9 dias, diversas imagens estavam inadequadas para as análises. Essa intensa frequência de nuvens em imagens do sensor OLI é destacada por Parente et al. (2017), os quais apontam que cerca de 80% do território brasileiro apresentou apenas 12, ou menos, imagens livres de nuvens e/ou sombras de nuvens durante o ano de 2015.

A falta de imagens em séries temporais, principalmente em momentos chaves do desenvolvimento de culturas agrícolas, diminui a eficiência de metodologias destinadas aos mais diversos estudos (FOERSTER et al., 2012). A confusão ocorrida com o agrupamento do talhão m\_33\_s1415 (Figura 5.6 e na Figura 5.15) no presente estudo é um exemplo desta limitação.

A incidência de nuvens também influenciou na quantidade de talhões de cada cultura destinados às análises. Apesar dessa diferença no número de talhões (30 de milho, 9 de cana e 8 de soja), os resultados das análises baseadas nos valores das 6 bandas espectrais e das 3 bandas (Figura 5.6 e Figura 5.15, respectivamente) se mostraram mais promissores que a análise realizada com base nos IVs (Figura 5.16 e Figura 5.17).

Interessante destacar que os agrupamentos formados com base nas 6 bandas OLI (B2 a B7) foram muito semelhantes aos agrupamentos formados quando se analisou apenas as bandas do *Red* (B4), NIR(B5) e SWIR (B6). Os bons resultados das análises de agrupamentos baseadas nas bandas (seis ou 3 bandas) provavelmente estão relacionados ao fato da informação espectral das três distintas

regiões espectrais do visível (VIS), NIR e SWIR, terem sido consideradas, enquanto que nas análises dos IVs apenas entram a informação de duas regiões espectrais (VIS e NIR), e de forma normalizada. Neste contexto, comprova-se que as bandas do SWIR (B6 e B7) tem papel fundamental na diferenciação das culturas. A eficiência do uso da informação espectro-temporal nas análises baseadas nas bandas (6 e 3 bandas) enfatiza a possibilidade de aprimorar, por exemplo, os métodos de classificação. Essa perspectiva é compartilhada por Peña et al. (2017), os quais obtiveram altos valores de acurácia ao utilizar as bandas do VIS, NIR e SWIR, do sensor OLI/Landsat – 8, no processo de classificação de espécies frutíferas no Chile. Os autores ainda destacaram que diversas abordagens de classificação utilizam apenas índices de vegetação, o que pode acarretar em perda de informação e baixos valores de acurácia.

As diferenças nos valores das bandas que cada cultura apresenta, como destacado por Peña et al. (2015), são suprimidas no momento em que os índices de vegetação são calculados. Adicionalmente, Wardlow et al. (2007) destacam a grande variabilidade nos valores dos picos de IVs da mesma cultura em áreas não irrigadas. Segundo os autores, esta variabilidade está relacionada às condições climáticas e práticas de manejo adotadas.

Apesar de eficientes, algumas confusões foram encontradas no presente estudo em certos agrupamentos das análises baseadas nas bandas (6 bandas e 3 bandas). Essas confusões ocorreram principalmente com talhões que apresentaram algum problema durante o desenvolvimento vegetativo (m\_43\_s16) ou por falta de dados espectrais em momentos específicos do desenvolvimento das plantas (m\_33\_s1415).

Destaca-se a necessidade contínua de coleta de dados de campo ao longo do desenvolvimento das culturas, os quais são essenciais para avaliar e analisar os erros, limitações e confusões encontradas no sensoriamento remoto agrícola. Essas observações também são confirmadas no estudo de Masialetti et al. (2010).

Os autores buscaram utilizar dados de campo adquiridos em um ano para extrair amostras de treinamentos e aplicá-las em imagens de outros anos por meio de classificadores. O resultado não foi satisfatório, pois mudanças nas datas de plantio ao longo dos anos acarretaram em erros de classificação.

De modo geral, as análises interespecíficas e intraespecíficas baseadas nas bandas espectrais (6 e 3 bandas) permitiram verificar que, para a área de estudo, as diferenças espectro-temporais da mesma cultura são menores que as diferenças espectro-temporais entre as culturas. O correto agrupamento das culturas em seus respectivos *clusters* nestas análises comprova que época de plantio e práticas culturais (safra ou safrinha, irrigado ou sequeiro) verificadas na presente pesquisa, não foram responsáveis pelos agrupamentos das culturas. Entretanto, vários outros elementos que não foram contemplados (variedades, densidade, espaçamento, orientação das fileiras de plantio, etc.) podem ter influenciado nos agrupamentos.

O resultado da análise intraespecífica da cultura da soja apresentou uma tendência de agrupar os talhões de acordo com o período de plantio. Entretanto, o número limitado de amostras desta cultura prejudica o apontamento de motivos e justificativas para esta tendência.

Com base em todos os aspectos discutidos neste trabalho, percebe-se a complexidade e o desafio de se utilizar dados de sensoriamento no âmbito da atividade agrícola. Vários entraves foram encontrados ao se analisar apenas três culturas agrícolas e em uma ínfima porção da área agrícola brasileira. Assim, ao se extrapolar a escala de análise para o território nacional e aumentar o número de culturas, vários outros elementos serão adicionados, aumentando ainda mais o nível de complexidade. O que abre um campo imenso ainda a ser explorado pelo sensoriamento remoto.

## 7. CONCLUSÕES

A análise do perfil espectro-temporal das culturas da soja, do milho e da cana-de-açúcar, apesar da falta de dados ocasionada pela incidência de nuvens, especialmente no momento de cultivo da primeira safra, permitiu inferir sobre as diferenças e as características espectrais intrínsecas de cada cultura. Diferenças essas relacionadas com as características físicas, químicas e biológicas das plantas.

Apesar de ter sido realizada somente com base nas imagens da fase de desenvolvimento vegetativo do E2, a análise interespecífica com as 6 bandas possibilitou, de modo geral, o agrupamento correto das culturas, apresentando cinco confusões entre os 47 talhões analisados. Foram dois talhões de soja erroneamente agrupados (2 de 9), três de milho (3 de 30) e nenhuma ocorrência para os talhões de cana-de-açúcar. Ao verificar o perfil espectro-temporal individual dos talhões erroneamente agrupados, foi possível determinar o motivo por essas confusões, como a falta de imagens no período de máximo desenvolvimento das plantas (região central do E2) e desenvolvimento inferior e heterogêneo da cultura (com base nos dados de campo).

O resultado referente à análise interespecífica utilizando as 3 bandas (*Red*, NIR e SWIR) foi similar à análise feita com 6 bandas. No entanto, a análise interespecífica com base nos IVs (NDVI e EVI) não se mostrou eficaz. Resultado interessante e que indica que para a discriminação de diferentes culturas agrícolas as regiões espectrais do VIS-*Red*, NIR e SWIR são importantes.

Em relação à análise intraespecífica, apenas a soja apresentou uma tendência de formação de *cluster* de acordo com safra e safrinha, apesar de um talhão de safrinha ter sido agrupado com os talhões de safras. Porém, de modo geral foi possível inferir que a mesma cultura, cultivada em diferentes épocas (que causam mudança nas condições de iluminação) e sistemas de manejo distintos (irrigado artificialmente e não irrigado artificialmente), não apresentam características espectrais

discrepantes. Assim, pode-se afirmar que a variação espectro-temporal intraespecífica é maior que a variação interespecífica, o que reitera a eficiência de dados de SR na discriminação de diferentes culturas agrícolas.

Com base na experiência adquirida e nas indagações estabelecidas ao longo da pesquisa, recomenda-se:

- Realizar análises intraespecíficas e interespecíficas entre outras culturas com fitofisionomias semelhantes como, soja e feijão; milho, sorgo e milheto, etc.
- Aplicar essa metodologia em talhões cultivados em diferentes regiões produtoras (MT, GO, BA, MG) no Brasil, com estrutura fundiária e práticas de manejo distintas.
- Utilizar metodologias multissensor para ampliar o número de dados disponíveis para as análises.
- Combinar metodologias de detecção de estádios fenológicos, métricas de curvas espectrais e IVs, de integração de sensores.
- Estudar a possibilidade de elaborar um índice de vegetação baseado nas bandas do *Red* (B4), NIR (B5) e SWIR (B6).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRITEMPO. Sistema de monitoramento agrometeorológico. Disponível em <[https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=S&lang=pt\\_br](https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=S&lang=pt_br)>. Acesso 1 abr. 2018.

AGROSTAT. SISTEMA DE ESTATÍSTICAS DE COMÉRCIO EXTERIOR DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. 2016. Disponível em <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>. Acesso 30 jan. 2017.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; CARVALHO JUNIOR, O. A. **MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003.

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. 949-98, 2013.

AYALA-SILVA, T.; BEYL, C. A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 2, 305-317, 2005.

BAILEY, J. T.; BORYAN, C. G. **Remote sensing applications in agriculture at the USDA National Agricultural Statistics Service**. Fairfax, VA: USDA, 2010.

BATTUDE, M.; AL BITAR, A.; MORIN, D.; CROS, J.; HUC, M.; SICRE, C. M.; DEMAREZ, V. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 184, p. 668-681, 2016.

BOGREKCI, I.; LEE, W. S. The effects of soil moisture content on reflectance spectra of soils using UV-VIS-NIR spectroscopy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2004, Minneapolis, USA. **Proceedings...** 2004.

BOWMAN, W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 3, p. 249-255. 1989.

BUNNIK, N. J. J. **The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties**. 1978. 194p. Thesis (Doctor in Landbouwwetenschappen) – Wageningen University, Wageningen, 1978.

CHEN, D.; HUANG, J.; JACKSON, T. J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near-and short-wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2, p. 225-236, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Boletim Grãos, v. 3, n. 11, 2016. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_06\\_09\\_09\\_00\\_00\\_boletim\\_graos\\_junho\\_\\_2016\\_-\\_final.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_06_09_09_00_00_boletim_graos_junho__2016_-_final.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2017.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; de OLIVEIRA, M. F.; SANTANA, D. P. **Manejo da cultura do milho em sistema plantio direto**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

DEKALB. **Corn and soybean growth stages guide**. Disponível em: <http://www.dekalb.ca/corn/214-corn-and-soybean-growth-stages-guide>. Acesso em: 01 fev. 2018.

DELEGIDO, J.; VERRELST, J.; RIVERA, J. P.; RUIZ-VERDÚ, A.; MORENO, J. Brown and green LAI mapping through spectral indices. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 35, p. 350-358. 2015.

DU PONT – PIONNER. **Staging corn growth**. 2018. Disponível em: <https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/staging-corn-growth/>. Acesso em: 28 fev. 2018.

FANCELLI, A. L. Manejo baseado na fenologia aumenta eficiência de insumos e produtividade. **Visão Agrícola**, n.13, p.25-29, 2015.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A.F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages on soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 11p.

FITZGERALD, G.; RODRIGUEZ, D.; O'LEARY, G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index: the canopy chlorophyll content index (CCCI). **Field Crops Research**, v. 116, n. 3, p. 318-324, 2010.

FOERSTER, S.; KADEN, K.; FOERSTER, M.; ITZEROTT, S. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, 30-40, 2012.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; BALZER, C. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337-342, 2011.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Relações entre parâmetros espectrais e agrônômicos das culturas de trigo e feijão**. São José dos Campos: INPE, 1989. 79p.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de textos, 2017. ISBN 978-85-7975-277-3.

EBERHARDT, I. D. R.; SCHULTZ, B., RIZZI, R.; SANCHES, I. D. A.; FORMAGGIO, A. R.; ATZBERGER, C.; JOSÉ BARRETO LUIZ, A. Cloud cover assessment for operational crop monitoring systems in tropical areas. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 219, 2016.

GALFORD, G. L.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D. W.; CRONIN, T. W.; CERRI, C. E.; MUSTARD, J. F.; CERRI, C. C. Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 46, p.19649-19654, 2010.

GALFORD, G. L.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J.; GENDRIN, A.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 576-587, 2008

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Eds.). **Crop-water relations**. New York: Wiley, 1983. p. 445-479.

GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, v. 22, n. 3, p. 247–252, 1994.

GOEL, N. S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v. 4, p. 1-212, 1988.

HANAUER, J. G. **Crescimento, desenvolvimento e produtividade de cana-de-açúcar em cultivo de cana-planta e cana soca de um ano em Santa Maria, RS**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, RS, Brasil, 2011.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS

vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1/2, p. 195-213, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (2015)**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

IRONS, J. R.; DWYER, J. L.; BARSÍ, J. A. The next Landsat satellite: the Landsat data continuity mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 11-21, 2012.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007. 592p.

JOHNSON, D. M. An assessment of pre-and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, p. 116-128, 2014.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1/2, p. 244-262, 2002.

KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J. **Finding groups in data: an introduction to cluster analysis**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2009.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 2003.

LUIZ, A. J. B.; SANCHES, I. D.; TRABAQUINI, K.; EBERHARDT, I. D. R.; FORMAGGIO, A. R. Dinâmica agrícola em área de sobreposição de órbitas adjacentes dos satélites Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 1308-1315. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0239.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

MASIALETI, I.; EGBERT, S.; WARDLOW, B. D. A comparative analysis of phenological curves for major crops in Kansas. **GIScience and Remote Sensing**, v. 47, n. 2, p. 241-259, 2010.

MCMURTREY, J. E.; CHAPPELLE, E. W.; DAUGHTRY, C. S. T.; KIM, M. S. Fluorescence and reflectance of crop residue and soil. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 48, n. 3, p. 207-213, 1993.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS - MDCI. **Balança comercial:** janeiro - dezembro 2015. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/comercio-externo/estatisticas-de-comercio-externo/balanca-comercial-brasileira-acumulado-do-ano?layout=edit&id=1185>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

MELLO, M. P. **Classificação espectro-temporal de imagens orbitais para o mapeamento da colheita da cana-de-açúcar com queima da palha.** 2009. 132p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2009.

MELLO, M. P.; RUDORFF, B. F.; ADAMI, M.; RIZZI, R.; AGUIAR, D. A.; GUSSO, A.; FONSECA, L. M. A simplified bayesian network to map soybean plantations. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2010, Honolulu, Hawaii. **Proceedings...** IEEE, 2010. p. 351-354.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada:** uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - **MAPA.** **Zoneamento agrícola de risco climático 2017/2018.** Brasília, DF. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/zarc/index.htm>>. Acesso em: 07 fev. 2018.

MISHRA, A. K.; INES, A. V.; DAS, N. N.; KHEDUN, C. P.; SINGH, V. P.; SIVAKUMAR, B.; HANSEN, J. W. Anatomy of a local-scale drought: application of assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 15-29, 2015.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P.; RAJ, S.; WANG, S.; YANG, Y. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 3, p. 385-393, 2011.

MOGES, S. M.; RAUN, W. R.; MULLEN, R. W.; FREEMAN, K. W.; JOHNSON, G. V.; SOLIE, J. B. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 8, p. 1431-1441, 2005.

MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, p. 223-231, 2004.

MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; SHIMABUKURO, Y. E. Quantifying cropland expansion in cerrado and transition forest ecosystems with Modis satellite image time series. In: SYMPOSIUM ON CERRADO LAND-USE AND CONSERVATION, 2005. **Proceedings...** 2005.

MÜLLER, H.; RUFIN, P.; GRIFFITHS, P.; SIQUEIRA, A. J. B.; HOSTERT, P. Mining dense Landsat time series for separating cropland and pasture in a heterogeneous Brazilian savanna landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p.490-499, 2015.

NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 207-215, 2000.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4.ed. São Paulo: Blücher, 2011. 308 p.

OLIVEIRA, J. C.; TRABAQUINI, K.; EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; GALVÃO, L. S.; ADAMI, M. Analysis of agricultural intensification in a basin with remote sensing data. **GIScience and Remote Sensing**, v. 51, n. 3, p. 253-268, 2014.

OZDOGAN, M.; GUTMAN, G. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: an application example in the continental US. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3520–3537, 2008.

PEÑA, M. A.; BRENNING, A. Assessing fruit-tree crop classification from Landsat-8 time series for the Maipo Valley. **Remote Sensing of Environment**, Chile, v. 171, p. 234-244, 2015.

PEÑA, M. A.; LIAO, R.; BRENNING, A. Using spectrotemporal indices to improve the fruit-tree crop classification accuracy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 128, p. 158-169, 2017.

PINTER JUNIOR, P. J.; JACKSON, R. D.; ELAINE EZRA, C.; GAUSMAN, H. W. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International journal of remote sensing**, v. 6, n. 12, p. 1813-1825, 1985.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010. p. 68-102.

PONZONI, F. J.; SILVA, C. B. D.; SANTOS, S. B. D.; MONTANHER, O. C.; SANTOS, T. B. D. Local illumination influence on vegetation indices and Plant Area Index (PAI) relationships. **Remote Sensing**, v. 6, n. 7, p. 6266-6282, 2014.

RISSO, J. **Diagnóstico espacialmente explícito da expansão da soja no Mato Grosso de 2000 a 2012**. 2013. 110p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

ROCKENBACH, A. P.; OTOMAR CARON, B.; QUEIRÓZ DE SOUZA, V.; ELLI, E. F.; MACHADO DE OLIVEIRA, D.; MONTEIRO, G. C. Estimated length of soybean phenological stages. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p.1871-1882, 2016.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, 1974. Washington D.C. **Proceedings...** Washington: NASA, 1974. v.1, p. 309-317.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote sensing**, v.2 n. 4, 1057-1076, 2010.

RUDORFF, C. D. M.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n. 1, p.118-125, 2007.

SANCHES, I. D. A. **Sensoriamento remoto para o levantamento espectro-temporal e estimativas de área de culturas agrícolas**. 2004. 172p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SILVA, W. F. Imagens polarimétricas em banda L do SAR-R99B e do MAPSAR (simuladas) para distinguir culturas agrícolas. **Dissertação de mestrado**. São José dos Campos: INPE, p. 142. 2007

SOBENKO, L. R.; FANAYA JÚNIOR, E. D.; SANTOS, O. N. A.; MARQUES, P. A. A. Estimativa da necessidade de irrigação na cultura do milho safrinha em sorriso-MT por métodos agroclimatológicos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 3, p. 543-556, 2017.

TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, p. 215-221. 2010.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Global visualization**. Disponível em: < (<http://earthexplorer.usgs.gov/>)>. Acesso em: 20 jan. 2017.

VAN NIEL, T. G.; McVICAR, T. R. Determining temporal windows for crop discrimination with remote sensing: a case study in south-eastern Australia. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 45, n. 1-3, p. 91-108, 2004.

VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 46-56, 2016.

VICTORIA, D. D. C.; PAZ, A. R. D.; COUTINHO, A. C.; KASTENS, J.; BROWN, J. C. Cropland area estimates using Modis NDVI time series in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, 1270-1278, 2012.

VIEIRA, C.; MATHER, P.; MCCULLAGH, M. The spectral-temporal response surface and its use in the multi-sensor, multi-temporal classification of agricultural crops. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 33, n. B2, p. 582-589, 2000.

WALDHOFF, G.; CURDT, C.; HOFFMEISTER, D.; BARETH, G. Analysis of multitemporal and multisensor remote sensing data for crop rotation mapping. **ISPRS Annals of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Science**, v. 1, p.177-182, 2012.

WALDHOFF, G.; LUSSEM, U.; BARETH, G. Multi-data approach for remote sensing-based regional crop rotation mapping: a case study for the Rur catchment, Germany. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 61, p. 55-69, 2017.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L.; KASTENS, J. H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 3, p. 290-310, 2007.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I – variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, London, v. 11, n. 44, p.41-76, 1947.

WEBER, H.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; IDO, O. T.; BARELA, J. D. Recuperação da produtividade de soqueiras de cana de açúcar com adubação NPK. **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 73-77, 2001.

WHITCRAFT, A. K.; BECKER-RESHEF, I.; JUSTICE, C. O. A framework for defining spatially explicit earth observation requirements for a global agricultural monitoring initiative (GEOGLAM). **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1461-1481, 2015a.

WHITCRAFT, A. K.; BECKER-RESHEF, I.; KILLOUGH, B. D.; JUSTICE, C. O. Meeting earth observation requirements for global agricultural monitoring: an evaluation of the revisit capabilities of current and planned moderate resolution optical earth observing missions. **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1482-1503, 2015b.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C.; GAO, F.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote sensing of environment**, v. 84, n. 3, p.471-475, 2003.

## APÊNDICE A

```
library(raster)
library(rgdal)

#define os diretorios e outras coisas mais...
rdir <- "G:/INPE/Dissertacao/Landsat"
sdir <- "G:/INPE/Dissertacao/Landsat"
shpname <- "crops" #nome do shape
over <- 0.8 #% de cobertura minima para inclusao do pixel (de 0 a 1)
shpid <- "Id" #nome do campo com o ID de referencia no shape (os poligonos serao identificados
por esse ID na tabela final)

#abre o shape e checa
shp <- readOGR(sdir, shpname, stringsAsFactors=F)
shp #informacoes gerais do shape
shp@data[1:5,] #olha as 5 primeiras linhas da tabela de atributos
plot(shp) #plota

#lista as imagens com "band" no nome
rfiles <- list.files(rdir, pattern="band", full.names=T)
rfiles #checa os arquivos selecionados

#lista as bandas e o codigo da cena
info <- gsub(paste0(rdir,"/|", "_sr|.tif"), "", rfiles)
info <- strsplit(info, "_")
info <- data.frame(matrix(unlist(info), nrow=length(info), byrow=T), stringsAsFactors=F)
info <- cbind(rfiles, info)
info$rfiles <- as.character(info$rfiles)
names(info) <- c("file", "scene", "band")
info #checa

# #abre a primeira imagem da lista e checa
# dummy <- raster(rfiles[1])
# dummy #informacoes gerais do raster
# plot(crop(dummy, extent(shp))) #plota a área coberta pelo shape
# plot(shp, add=T) #plota o shape em cima

#loop sobre cada cena/data, para extrair os dados de interesse
unisc <- unique(info$scene)
for (sc in 48:length(unisc)) {

#cria um stack com todas as imagens daquela cena/data (assume mesmas dimensoes)
gids <- which(info$scene == unisc[sc])
rs <- raster(info$file[gids[1]])
for (i in 2:length(gids)) {
dummy <- raster(info$file[gids[i]])
rs <- stack(rs, dummy)
```

```

}
names(rs) <- info$band[gids]
ndvi <- (rs$band5 - rs$band4) / (rs$band5 + rs$band4)
evi <- 2.5 * (rs$band5 - rs$band4) / (1 + rs$band5 + 6 * rs$band4 - 7.5 * rs$band2)
rs <- stack(rs, ndvi, evi)
names(rs)[(nlayers(rs)-1):nlayers(rs)] <- c("ndvi", "evi")
# rs #checa o stack

#cria tabelas para receber os dados extraidos das imagens
dados <- data.frame(array(NA, c(length(shp), 2*(length(gids)+2)+1)))
names(dados) <- c("id", paste0("med_", names(rs)), paste0("m100_", names(rs)))
dados100 <- data.frame(array(NA, c(100*length(shp), length(gids)+2+1)))
names(dados100) <- c("id", names(rs))
# dados[1:5,] #checa

#loop para extrair os dados de interesse do stack para cada poligono
ext <- extract(rs, shp, weights=T, cellnumbers=T, normalizeWeights=F, df=T) #extrai os valores de
todos os pixels
ext <- ext[ext$weight >= over,] #elimina pixels com cobertura menor que "over"
pols <- unique(ext$ID) #ID provisorio dos poligonos
for (i in 1:length(pols)) {
  dext <- ext[ext$ID==pols[i], 3:(ncol(ext)-1)] #seleciona apenas dados de interesse
  dext[,1:(ncol(dext)-2)] <- dext[,1:(ncol(dext)-2)] / 10000
  if (any(is.na(dext))) {
    warning(paste0("O poligono de Id = ", shp@data$Id[i], " parece nao coincidir com a imagem
(todos os valores extraidos = NA)"))
    dados[i,1] <- shp@data$Id[i]
    next()
  }
  dmed <- apply(dext, 2, FUN=median, na.rm=T) #mediana
  dm100 <- array(NA, nlayers(rs))
  if (nrow(dext) >= 101) {
    dexts <- apply(dext, 2, sort)
    for (j in 1:nlayers(rs)) {
      dif <- abs(dexts[,j] - dmed[j])
      did <- which(dif == min(dif))
      if (length(did) > 1) did <- did[round(length(did)/2)]
      dm100[j] <- mean(dexts[(did-50):(did+50),j])
      dados100[(i*101 - 100):(i*101), j+1] <- dexts[(did-50):(did+50),j]
    }
  } else {
    warning(paste0("O poligono de Id = ", shp@data$Id[i], " possui menos de 101 pixels 'puros' ("
over*100, "% de cobertura). m100 nao calculado"))
  }
  dados[i,] <- c(shp@data$Id[i], dmed, dm100)
  dados100[(i*101 - 100):(i*101), 1] <- shp@data$Id[i]
}

# #extrai os dados de interesse do stack para cada poligono

```

```

# ext <- extract(rs, shp, weights=T, cellnumbers=T, normalizeWeights=F, df=T) #extrai os valores
de todos os pixels
# ext <- ext[ext$weight >= over,] #elimina pixels com cobertura menor que "over"

# #inclui o id do shape na tabela
# ide <- unique(ext$ID)
# idp <- unique(shp@data[,which(names(shp@data)==shpid)])
# if (length(ide) != length(idp)) stop("Problema com IDs")
# for (j in 1:length(ide)) ext$ID[ext$ID==ide[j]] <- idp[j]

#salva a tabela no diretorio das imagens
write.csv(dados, file=file.path(rdir, paste0("dados_", unisc[sc], ".csv")), row.names=F)
write.csv(dados100, file=file.path(rdir, paste0("dados100_", unisc[sc], ".csv")), row.names=F)
}

```