UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

***CAMPUS* DE CASCAVEL**

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DINÂMICA ESPECTRAL DA SOJA POR MEIO DO NDVI UTILIZANDO SENSORES ORBITAL E TERRESTRE

DIEGO DOMINGOS DELLA JUSTINA

CASCAVEL – Paraná – Brasil

Janeiro – 2014

DIEGO DOMINGOS DELLA JUSTINA

DINÂMICA ESPECTRAL DA SOJA POR MEIO DO NDVI UTILIZANDO SENSORES ORBITAL E TERRESTRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração **Sistemas Biológicos e Agroindustriais**.

Orientador: Dr. Erivelto Mercante

Coorientadores: Dr. Jerry Adriani Johann
Dr. Miguel Angel Uribe Opazo

CASCAVEL – Paraná – Brasil

Janeiro – 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

D396d Della Justina, Diego Domingos
Dinâmica espectral da soja por meio do NDVI utilizando sensores orbital e terrestre. / Diego Domingos Della Justina — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
66 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Erivelto Mercante
Coorientador: Prof. Dr. Jerry Adriani Johann
Coorientador: Prof. Dr. Miguel Angel Uribe Opazo
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Perfis temporais. 3. NDVI/MODIS. 4. GreenSeeker. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21. ed. 633.34

Revisora de Língua Portuguesa, Língua Inglesa e Normas Editoriais: Dhandara Soares de Lima.

DIEGO DOMINGOS DELLA JUSTINA

"Dinâmica espectral da soja por meio do NDVI utilizando sensores orbital e terrestre"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação "S*tricto Sensu"* em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Erivelto Mercante
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Unioeste

Prof. Dr. Claudio Leones Bazzi
Coordenação de Ciência da Computação, UTFPR

Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Unioeste

Prof. Dr. Marcio Furlan Maggi
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Unioeste

Cascavel, 30 de janeiro de 2014.

“Há duas maneiras de espalhar a luz: ser a vela ou o espelho que reflete”.

Edith Wharton

A Deus ofereço...

A meus pais, Paulo e Clarice, e a

minha namorada, Priscila, com

muito amor e carinho!

Dedico!

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, a saúde, a proteção e o direcionamento...

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), pela infraestrutura, auxílio e oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Erivelto Mercante, pela orientação na realização deste trabalho, por todo o conhecimento concedido, pelos auxílios prestados, pela infraestrutura do Laboratório de Geoprocessamento (GEOLAB). Pela amizade, o companheirismo, a disponibilidade e a compreensão ao longo desses anos. À sua família, Vanessa Ishisato e Eduardo Mercante, pelos laços de amizade e companheirismo;

Ao meu co-orientador, Dr. Jerry Adriani Johann, pelas inúmeras contribuições ao trabalho, pela amizade íntegra e por sua disponibilidade em ajudar sempre.

Ao Professor Dr. Miguel Angel Uribe-Opazo, pela dedicação e o conhecimento transmitido ao longo do trabalho;

Aos meus amigos, Antônio Martini, Daniel Morais, João Guerra, Lisdefferson Hamman, Maurílio Palhari, Marcos Alexandre, Patric Marcon, Victor Krepschi, pela amizade e bons momentos divididos;

Aos amigos do GEOLAB, Bruno Bonemberger, Carlos Cattani, Carlos Souza, Jefferson Gonçalves, Lucas Oldoni, Luiz Eduardo Peruzzo, Paulo Peruzzo, Rafaela Nicolau, Suzana Wrublack e Victor Prudente, pela amizade e aos auxílios prestados;

À COODETEC, pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento do trabalho, especialmente ao Laboratório de Biotecnologia e toda a equipe, pela ajuda prestada, ao Dr. Ivan Schuster, por ter me proporcionado essa oportunidade, e aos engenheiros agrônomos Antenor Canton e Julio Crivelli, pelo fornecimento de dados;

À secretária da pós-graduação Vera Celita Schmidt, pelos auxílios prestados com dedicação e comprometimento;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida.

À minha namorada, Priscila Grutzmacher, pelo imenso apoio prestado durante essa jornada, pela compreensão e paciência exigidos em função de todas as dificuldades enfrentadas, além da distância. À toda a sua família, pelo suporte oferecido nesse período, especialmente a Robson Barizon e Vanessa Hachiman, por me acolherem tantas vezes em Campinas, fazendo eu me sentir em casa;

A toda a minha família, que foram os pilares dessa conquista;

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

DINÂMICA ESPECTRAL DA SOJA POR MEIO DO NDVI UTILIZANDO SENSORES ORBITAL E TERRESTRE

RESUMO

Uma vez que a soja é uma importante cultura agrícola, com expressiva participação econômica, se faz necessário a adoção de práticas que viabilizem a previsão de safra, contribuindo para melhor posicionamento da *commodity* no mercado. Metodologias de acompanhamento de produção por sensoriamento remoto orbital são alternativas eficazes devido ao baixo custo, grande escala de abrangência e rapidez. Uma das técnicas de acompanhamento agrícola empregada são os índices de vegetação, dentre eles o NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, que vem sendo empregado em larga escala por meio do sensor MODIS. Porém, sensores orbitais estão sujeitos à influência dos fatores atmosféricos e da dinâmica das culturas, que podem apresentar diferentes comportamentos espectrais entre cultivares de uma mesma espécie. Nesse contexto, a espectroscopia terrestre, (não-orbital), pode ser uma solução viável para o estudo da existência de variações no comportamento espectral de qualquer cultura agrícola, sem maiores interferências de fatores exógenos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os perfis temporais de NDVI obtidos com o sensor orbital MODIS e o sensor não-orbital GreenSeeker durante o ciclo de desenvolvimento da soja. O estudo foi conduzido em dois talhões (T1 e T2) localizados nas dependências da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola – COODETEC, no município de Cascavel – PR. Amostras de NDVI de treze *pixels*, sendo três puros e dez não puros, foram tomadas em intervalos não regulares, porém, representativos ao desenvolvimento da cultura. Os dados obtidos por meio do sensor não-orbital foram submetidos a análise exploratória. As médias de ambos os sensores orbital e não-orbital foram comparadas pelo teste-t a 5% de significância. O teste de comparação de médias demonstrou que os dados obtidos entre os dois sensores são estatisticamente diferentes. No entanto, ambos demonstraram um bom alcance dinâmico e sensibilidade para monitorar e acessar variações espaciais e temporais da vegetação.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, perfis temporais, NDVI/MODIS, GreenSeeker.

SOYBEAN SPECTRAL DYNAMICS THROUGH NDVI USING ORBITAL AND TERRESTRIAL SENSORS

ABSTRACT

Soybeans are an important agricultural crop, with expressive economical participation; thus, it is necessary the adoption of practices that enable crop forecasting, contributing for a better market position of this commodity. Remote sensing methodologies for monitoring production through are highly effective, due to their low cost, large-scale coverage and smaller time consumption. One of these techniques used is the NDVI – Normalized Difference Vegetation Index, which has been employed on a large scale through use of the MODIS sensor. However, orbital sensors are subject to the influence of atmospheric factors and the culture dynamics, which may have different spectral behaviors among cultivars of the same species. In this context, non-orbital spectroscopy would be a viable solution for studying the existence of variations in the spectral behavior of any crop without further interference from exogenous factors. Thus, the aim of this work was to evaluate the temporal profiles of NDVI obtained with orbital MODIS sensor and non-orbital sensor GreenSeeker during the soybean development cycle. The study was conducted in two plots (T1 and T2) located on the Central Cooperative of Agricultural Research - COODETEC, in Cascavel – State of Paraná. Samples of NDVI of thirteen pixels, three of them called pure pixels and ten non pure pixels, were taken at irregular intervals, but representing crop cycle. The data obtained by the non-orbital sensor were analyzed by exploratory analysis. Means of both orbital and non-orbital sensors were compared by test-t at 5% significance level. The means comparison test demonstrated the data obtained through the two sensors to be statistically different. However, both showed good dynamic range and sensibility to monitor and access spatial and temporal variations in the vegetation.

Keywords: remote sensing, temporal profiles, NDVI/MODIS, GreenSeeker.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 2

2.1 Objetivo geral 2

2.2 Objetivos específicos 2

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

3.1 A cultura da soja 3

3.1.1 Origem 3

3.1.2 Importância econômica e perspectivas 3

3.1.3 Morfologia, crescimento e desenvolvimento 6

3.2 Sistema de previsão de safra 9

3.2.1 Sensoriamento remoto 10

3.2.2 Índices de vegetação 12

3.2.3 Uso de perfis temporais de NDVI no estudo da vegetação 13

3.2.4 O sensores para medição de IV 14

MATERIAL E MÉTODOS 17

4.1 Área de estudo 17

3.2 Dados de precipitação 18

3.5 Análise dos dados 23

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 25

5.1 Dados NDVI obtidos com sensor não-orbital 25

5.2 Dados NDVI obtidos com sensor orbital 34

5.3 Verificação das condições agrometeorológicas de precipitação e comparação dos dados de NDVI obtidos com sensores orbital e não-orbital 36

6 CONCLUSÕES 41

7 REFERÊNCIAS 42

APÊNDICE 49

APÊNDICE A – GRÁFICOS BOXPLOT DO NDVI DOS *PIXELS* E RESPECTIVAS SUBAMOSTRAS. 50

APÊNDICE B – GRÁFICOS DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI OBTIDOS COM OS SENSORES ORBITAL E NÃO-ORBITAL EM *PIXELS* NÃO PUROS 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Descrição dos estádios de desenvolvimento da soja..... 9
Tabela 2 Data das coletas de dados não-orbitais e intervalo entre coletas 22
Tabela 3 Grupos de semeadura, cultivares e pixels utilizados para Análise de Variância 23
Tabela 4 Relação de datas correspondentes à obtenção dos dados não-orbitais e do primeiro dia da composição de 16 dias do sensor orbital..... 24
Tabela 5 Análise exploratória dos dados de NDVI obtidos com o sensor não-orbital (GreenSeeker®) referentes ao *pixel* 13, e os estádios vegetativos nas referidas datas de coleta 26
Tabela 6 Valores obtidos de NDVI e da refletância nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo dos alvos vegetação densa, soloexposto e solo com palha. 27
Tabela 7 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das cultivares de soja do grupo de semeadura 1 em diferentes datas de amostragem ao longo do ciclo.. 33
Tabela 8 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das cultivares de soja do grupo de semeadura 2 em diferentes datas de amostragem ao longo do ciclo.. 33
Tabela 9 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das cultivares de soja do grupo de semeadura 3 em diferentes datas de amostragem ao longo do ciclo.. 33
Tabela 10 Relação das datas das imagens (composição de 16 dias), de aquisição dos *pixels*, e as respectivas datas de aquisição dos dados do sensor não-orbital, utilizada na comparação de média 37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Saldos da balança comercial do complexo soja, do agronegócio, de outros setores econômicos e do Brasil (bilhões de US$). 4

Figura 2 Produção (a), área (b) e produtividade (c) da cultura da soja no estado do Paraná. 5

Figura 3 Grupos de maturação de soja. 7

Figura 4 Infográfico da fenologia da soja e intervalo médio de dias entre estádios. 8

Figura 5 Assinatura espectral (média) da folha verde. 11

Figura 6 Comportamento do NDVI de uma vegetação sadia (esquerda) e não sadia ou em senescência (direita). 13

Figura 7 Perfil temporal do NDVI no município de Assis Chateaubriand – PR, na safra 03/04. 14

Figura 8 Mapa de localizaçãoda área experimental, com indicação dos talhões (T1 e T2), localizados nas dependências da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (COODETEC). 17

Figura 9 Esquema de distribuição das cultivares implantada no talhão T1 agrupadas pela data de semeadura (a); talhão T2 (b). 18

Figura 10 Distribuição de *pixel*s com destaque para *pixel*s puros referentes à T1(a) e a distribuição de *pixel*s referentes a T2(b). 20

Figura 11 Sensor ótico GreenSeeker Hand Held™ RT100. 21

Figura 12 Detalhamento de sensor e altura de trabalho (a), posição e sentido do sensor na tomada de leitura e largura de trabalho (FOV) (b). 21

Figura 13 Grade amostral das leituras tomadas com o sensor GreenSeeker® para talhão T1 (a) e talhão T2 (b). 22

Figura 14 Perfil temporal demédio de NDVI e boxplot dos dados nas respectivas datas de coleta, e informações sobre a fenologia da soja. 26

Figura 15 Fotografias obtidas na área referente ao *pixel 13*, representando o aspecto da cultura em diferentes estádios de desenvolvimento. 28

Figura 16 Boxplot dos dados de NDVI para o período avaliado, obtidos para cada subamostra A(a), B(b), C(c), D(d), E(e), e do conjunto de dados formado a partir do agrupamento das subamostras (f), referente ao *pixel* 13. 30

Figura 17 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 12 (f) e das subamostras A (a), B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado. 31

Figura 18 Boxplot dos dados de NDVI para o período avaliado, obtidos para cada subamostra A(a), B(b), C(c), D(d), e do conjunto de dados formado a partir do agrupamento das subamostras (e), referente ao *pixel* 6. 32
Figura 19 Perfis temporais de NDVI dos *pixels* do talhão T1 considerados como puros. ... 34
Figura 20 Perfis temporais de NDVI dos *pixels* do talhão T1, considerados como não puros. 35
Figura 21 Perfis temporais de NDVI dos *pixels* do talhão T2 considerados como não puros. 36
Figura 22 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 3 e a precipitação acumulada do período. 38
Figura 23 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 5 e a precipitação acumulada do período. 38
Figura 24 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 8 e a precipitação acumulada do período. 39
Figura 25 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 1 (a) e das subamostras B (b) e E (c) para o período avaliado. 50
Figura 26 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 2 (a) e das subamostras B (b), C (c) e E (d) para o período avaliado. .. 51
Figura 27 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 3 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado. 52
Figura 28 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 4 (a) e das subamostras B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado. 53
Figura 29 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 5 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado. 54
Figura 30 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 6 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d) e D (e) para o período avaliado. 55
Figura 31 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 7 (a) e das subamostras B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado. 56

Figura 32 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 8 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado. 57
Figura 33 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 9 (a) e das subamostras A (b), C (c) e D (d) para o período avaliado. .. 58
Figura 34 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 10 (a) e das subamostras B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado. 59
Figura 35 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 11 para o período avaliado. 60
Figura 36 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 13 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado. 61
Figura 40 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 1 e precipitação acumulada do período. 62
Figura 41 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 2 e precipitação acumulada do período. 62
Figura 42 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 4 e precipitação acumulada do período. 63
Figura 43 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 6 e precipitação acumulada do período. 63
Figura 44 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 7 e precipitação acumulada do período. 64
Figura 45 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 9 e precipitação acumulada do período. 64
Figura 46 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 10 e precipitação acumulada do período. 65
Figura 47 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 11 e precipitação acumulada do período. 65

Figura 48 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 12 e precipitação acumulada do período. 66

Figura 49 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 13 e precipitação acumulada do período. 66

1 INTRODUÇÃO

Globalmente, a soja é uma das mais importantes culturas agrícolas. No Brasil, se destaca com alta tecnologia agregada, que permite que a cultura represente cerca de 40% da produção agrícola nacional (IBGE, 2013a). Esta oleaginosa é a principal fornecedora de óleo para alimentação humana e farelo, utilizado também para alimentação animal, além de outros muitos produtos processados.

Sendo a agricultura uma atividade de risco, uma vez que é altamente sujeita a fatores de difícil previsão, tais como as alterações agrometeorológicas, o planejamento governamental é essencial para a manutenção da segurança alimentar. As políticas de monitoramento agrícola melhoram a alocação de recursos, reduzem as flutuações de mercado e garante segurança alimentar.

De maneira geral, os sistemas de monitoramento devem prover informações em tempo hábil. Atualmente estes dados são estimados por questionários aplicados a agricultores e órgãos ligados à atividade agrícola, o que torna o método laborioso e lento.

Técnicas de geoprocessamento ligadas ao sensoriamento remoto proveem subsídios ao monitoramento agrícola, permitindo maior agilidade em processos como estimativa da área cultivada e do rendimento. Uma das técnicas para monitoramento da cultura é a dinâmica espectral, determinada por mensurações da quantidade e do vigor da vegetação, denominados índices de vegetação (IV). Os IV são combinações dos valores de refletância em dois ou mais intervalos de comprimento de onda, os quais possuem relação com a quantidade e o estado da vegetação.

Um dos métodos de obtenção dos IV é o sensoriamento orbital, que permite recobrimento de grandes extensões territoriais em um curto período de tempo, características estas desejáveis na aplicação do monitoramento de safras. No entanto, fatores exógenos podem influenciar os dados orbitais, dentre eles a interferência atmosférica, a dinâmica agrícola, e além disso, diferentes cultivares de uma mesma espécie agrícola podem apresentar diferentes comportamentos espectrais.

Nesse contexto, a espectroscopia terrestre apresenta uma solução viável para o estudo da existência de variações no comportamento espectral de diferentes cultivares de soja, com ciclo, hábito de crescimento e estrutura morfológica distintas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Comparar dados de NDVI obtidos a partir de sensor orbital passivo e não-orbital ativo, através de perfis espectro-temporais, a fim de verificar a possibilidade de utilização de sensor não-orbital na complementação dos dados do sensor orbital.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a sensibilidade dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) diante das variações espacial e temporal da cultura;
- Verificar a influência do fator cultivar através de diferenças na resposta espectral;
- Comparar dados de NDVI obtidos com os sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A cultura da soja

3.1.1 Origem

O nome soja é originário do japonês *shoyu* e foi nominada pelo Imperador chinês Sheng-Nung há aproximadamente 2.838 A.C. O espécime vegetal pertence ao reino *Plantae*, divisão *Magnoliophyta*, classe *Magnoliopsida*, ordem *Fabales,* família *Fabaceae (Leguminosae)*, subfamília *Faboideae (Papilionoideae)*. O gênero *Glycine*é dividido em várias espécies originárias da África, Ásia oriental e Austrália (SEDIYAMA et al., 2009).

Os chineses consideravam a soja, juntamente com o arroz, o trigo, a cevada e o milheto, um dos cinco grãos sagrados, essenciais para a existência da civilização. O cultivo da soja era marcado com grande cerimonial pelos imperadores, enaltecendo as suas virtudes. Relatos apontam que a domesticação da soja teve início há 1.100 anos A.C., na China. Logo após, foi introduzida na Coréia e no Japão por volta dos anos 200 e 300 A.C. (SEDIYAMA et al., 2009).

A introdução desta cultura agrícola na Europa se deu por Paris, França, nos anos de 1740, sendo difundida por todo o continente após grandes campanhas que ocorreram em 1875. Nos Estados Unidos da América, o primeiro relato da cultura se deu por volta de 1804, onde pela primeira vez foi esmagada para extração do óleo para consumo humano (PROBST; JUDD, 1973).

No Brasil a soja foi cultivada inicialmente na Bahia em 1882, por Gustavo D'Utra e posteriormente, em 1891, foi introduzida em Campinas-SP. Uma vez que estas cultivares eram de origem norte americana, a soja obteve melhor adaptação nesta latitude, em função do clima favorável.No mesmo ano, outras cultivares foram introduzidas no Rio Grande do Sul (SANTOS, 1988). Na década de 1920, a cultura foi introduzida em Minas Gerais e, por volta de 1930, em Santa Catarina. Nos demais estados das regiões Central, Norte e Nordeste, a introdução ocorreu a partir de 1970 (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

3.1.2 Importância econômica e perspectivas

Segundo Brasil (2013a)**,** a soja é a cultura agrícola brasileira que mais cresceu na últimas três décadas e corresponde a 49% da área plantada de grãos no país. O aumento da

produtividade está associado aos avanços tecnológicos, ao manejo e à eficiência dos produtores. A soja é insumo para produção de grande variedade de produtos, sendo subproduto na cadeia produtiva de produção de rações animais e na cadeia produtiva de óleos e produtos de consumo humano (BRASIL, 2013a).

No contexto mundial, o Brasil possui significativa participação na oferta e na demanda de produtos do complexo agroindustrial da soja, o qual vem desempenhando papel fundamental para o desenvolvimento de várias regiões do País. Para destacar a importância do referido complexo para a economia nacional, pode-se utilizar algumas estatísticas de área, produção e produtividade.

De acordo com dados de oferta e demanda obtidos pela CONAB (2013), as exportações do complexo soja representa 14% das exportações nacional. Em relação ao comércio exterior, o complexo soja (Figura 1)**,** em 2009, obteve saldo comercial correspondente a 31,34% do saldo obtido pelo agronegócio e 67,94% do saldo obtido pelo país. A soja em grão, cujas exportações apresentaram um crescimento anual de 16,62%, no período entre 1997 a 2009, propiciaram a obtenção de saldos comerciais positivos fundamentais para equilibrar a balança comercial do Brasil (CONAB, 2013).

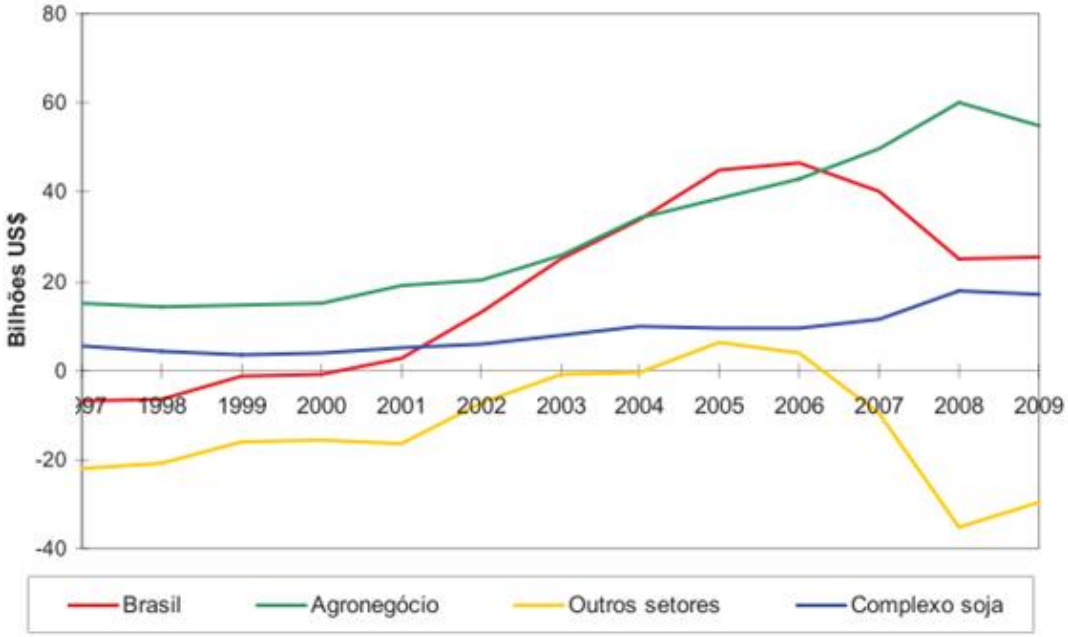


Figura 1 Saldos da balança comercial do complexo soja, do agronegócio, de outros setores econômicos e do Brasil (bilhões de US$).

Fonte: BRASIL (2013b).

Pode-se observar na Figura 1 a grande dependência do agronegócio que o País possui, pois, ao desconsiderá-lo, o Brasil se depara com um grande déficit comercial, ficando evidente que o país é um grande exportador de produtos de origem agropecuária e grande importador de produtos de outras naturezas.

Segundo levantamento do FAS (*Foreign Agricultural Service*) do Departamento de Agricultura norte americano (USDA, 2013)**,** o mundo produziu um volume recorde de soja (267,7 milhões de toneladas), cerca de 11,7% maior que a safra 2011/2012. Dentre os três maiores produtores mundiais, Brasil e Argentina juntos acrescentaram 28,5 milhões de toneladas à produção mundial. Devido à queda de 3,3% em relação ao ano anterior na produção dos Estados, o Brasil passou a ser o maior produtor mundial, com acréscimo de 21,8% em relação à safra anterior, passando de 66,5 a 81,0 milhões de toneladas (USDA, 2013).

De acordo com CONAB (2013), o estado do Paraná é um dos principais produtores de soja do país, com produção atual de 15,08 milhões de toneladas (Figura 2), ficando atrás apenas do estado do Mato Grosso com 23,70 milhões de toneladas.

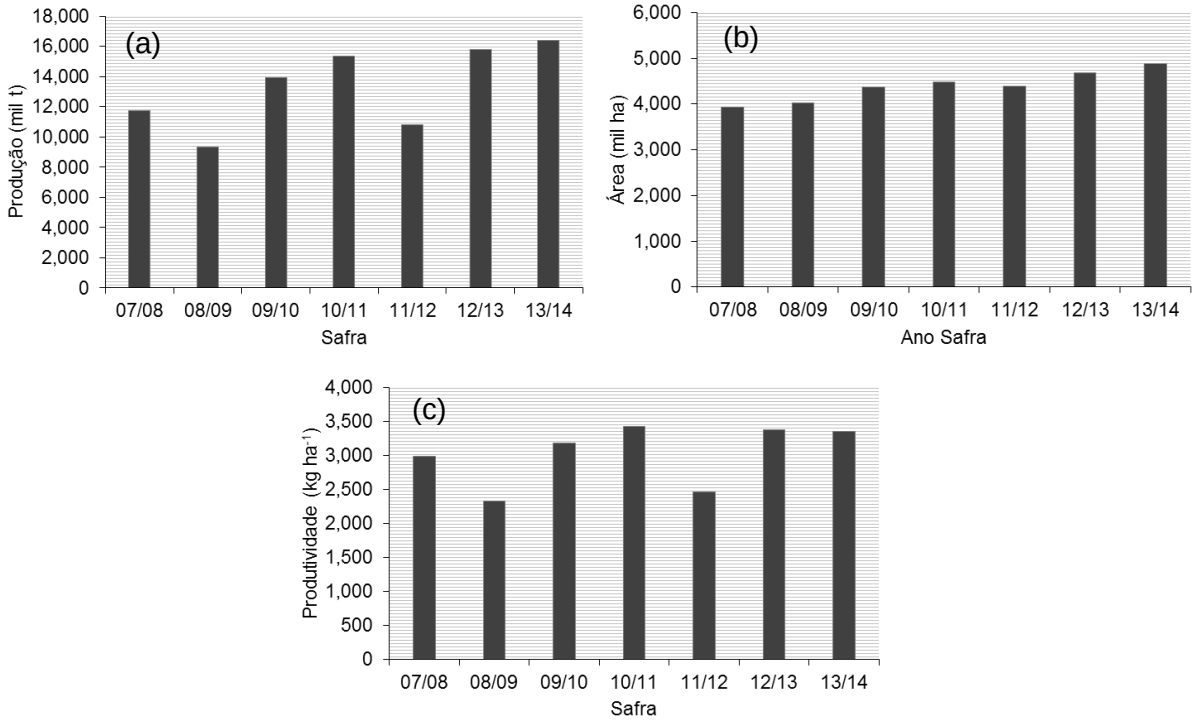


Figura 2 Produção (a), área (b) e produtividade (c) da cultura da soja no estado do Paraná.
Fonte: PARANÁ (2013).

De acordo com a série histórica de safras dos últimos cinco anos (PARANÁ, 2013), a expansão da área cultivada com soja (Figura 2b) foi o maior contribuinte para aumento da produção (Figura 2a), uma vez que a produtividade, considerando anos não adversos (2010/2011 e 2012/2013), foi semelhante. As quedas nos anos safra 2008/2009 e 2011/2012 na produtividade e, consequentemente, na produção, são frutos das estiagens provocadas pelo fenômeno “La Niña” que atingiu principalmente a região sul do país. As projeções para a safra 2013/2014 também apontam para aumento na produção e na área cultivada (Figuras 2a e 2b), ao passo que a produtividade permanece praticamente estática.

3.1.3 Morfologia, crescimento e desenvolvimento

Em função do elevado número de cultivares existentes, resultado do melhoramento genético, a soja apresenta grande diversidade genética e morfológica que buscam características como: maior produtividade, resistência a pragas, doenças e adaptação a diversas condições edafoclimáticas (COSTA et al., 2004; EMBRAPA, 2011).

Essas modificações genéticas criaram uma grande variabilidade das características morfológicas, as quais são ainda influenciadas pelo ambiente. De acordo com Sinclair *et al.* (2005)**,** a soja é uma planta altamente dependente da interação entre genótipo e ambiente, podendo variar seu ciclo e seu desenvolvimento vegetativo, dependendo da interação, sendo que os principais fatores ambientais responsáveis pela variação do desenvolvimento da cultura são a temperatura e o fotoperíodo.

Devido à sensibilidade da soja ao fotoperíodo, a adaptabilidade de cada cultivar varia, uma classificação para essas cultivares é chamada de “Grupos de Maturação”(Figura 3). Segundo Kaster e Farias (2011)**,** a classificação quanto à maturidade ou ciclo de maturação é baseada na adaptabilidade de um cultivar em utilizar efetivamente a estação de crescimento de uma determinada região. Esta é medida entre o período que varia da emergência à maturação fisiológica dos grãos. Este sistema varia de zero a 10, ou seja, quanto maior é o seu número, mais próximo ao Equador será sua região de adaptação. Como podemos ver na Figura 3, no Brasil os grupos indicados variam de 5 a 10. Cada grupo de maturaçãose ajusta melhor em determinada faixa de latitude, em função de sua resposta ao fotoperíodo, variando de acordo com a quantidadede horas/luz a que é exposta (PENARIOL, 2000)

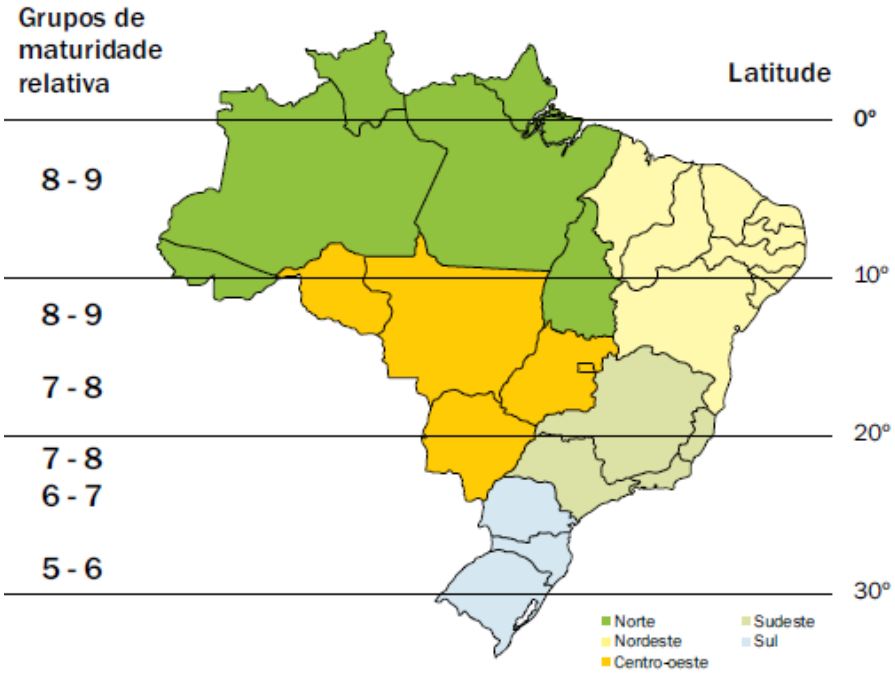


Figura 3 Grupos de maturação de soja.
Fonte: Adaptado de Alliprandini et al. (2009).

Cultivares de tipo de crescimento determinado, típicas de cultivos no Brasil, pertencentes ao grupo de maturação 5 a 10 são caracterizadas por plantas que possuem o crescimento vegetativo paralisado após o florescimento, ou em algumas circunstâncias estas ainda podem crescer cerca de 10% da sua altura final. Portanto, ao entrar no estádio reprodutivo, a planta já atingiu aproximadamente 90% da sua altura e matéria seca final. Assim, são plantas de maior ramificação, menor altura e, consequentemente, menor número de nós. As folhas da parte superior do caule são maiores, conferindo ao dossel vegetativo aspecto mais fechado. A maturação das vagens ocorre de cima para baixo (SEDIYAMA et al., 2005).

Por outro lado, cultivares de tipo de crescimento indeterminado, cultivadas especialmente na região norte dos Estados Unidos da América, incluídas nos grupos de maturação 0 a 4, possuem apenas inflorescência axilar, uma vez que a gema terminal mantém atividade vegetativa após o florescimento, desenvolvendo nós e alongando o caule (SEDIYAMA et al., 2005). Deste modo, têm maiores altura e número de nós. A parte terminal do caule é mais delgada, e, as folhas e pecíolos possuem maiores dimensões na região central do caule (MÜLLER, 1981). A maturação das vagens inicia-se na parte inferior da planta.

Nas cultivares de hábito de crescimento semideterminado, as plantas possuem inflorescência racemosa terminal e axilar. Ao florescer, já atingiram cerca de 70% da altura final. A maturação das vagens é semelhante às de hábito determinado. Já cultivares de hábito

indeterminado são caracterizadas pela continuação do crescimento vegetativo após o início do florescimento.

A fim de tornar o sistema de produção mais eficiente, por meio de um manejo adequado da lavoura, levando à maximização dos recursos utilizados e à obtenção de produtividade satisfatória, o desenvolvimento da cultura é dividido em estádios (Figura 4). Os estádios são uma terminologia padrão essencial para a compressão maturidade das cultivares, uma vez que as variedades diferem entre si quanto ao ciclo de desenvolvimento.

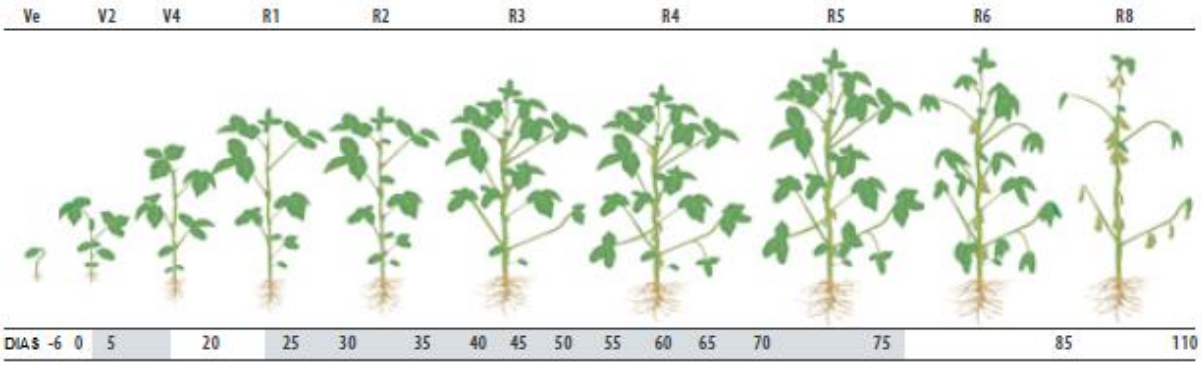


Figura 4 Infográfico da fenologia da soja e intervalo médio de dias entre estádios.
Fonte: Down AgroSciences (2014).

Ferh e Caviness (1977) propuseram a metodologia para descrição dos estádios de desenvolvimento da soja, sendo a mais difundida e utilizada mundialmente. A metodologia considera dois estádios (vegetativo e reprodutivo) durante todo o ciclo da planta. O estádio vegetativo (V_n) é compreendido pelo período de emergência da plântula até o início da floração e o estádio reprodutivo (R_n) corresponde ao período a partir do florescimento até a maturação (Tabela 1). No Brasil, utilizam-se mais dois sistemas, em que um foi proposto pelo Registro Nacional de Proteção de Cultivares e outro pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), os quais são semelhantes ao sistema de Ferh e Caviness.

Tabela 1 Descrição dos estádios de desenvolvimento da soja

Estádio	Denominação	Descrição
V_E	Emergência	Os cotilédones estão acima da superfície do solo
V_C	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
V_1	Primeiro nó	Folhas unifoliadas completamente desenvolvidas
V_2	Segundo nó	Primeira folha trifoliada completamente desenvolvida
V_3	Terceiro nó	Segunda folha trifoliada completamente desenvolvida
V_n	Enésimo nó	Ante-enésima folha trifoliada completamente desenvolvida
R_1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule (haste principal)
R_2	Florescimento pleno	Uma flor aberta num dos 2 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R_3	Início da formação da vagem	Vagem com 5 mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R_4	Vagem completamente desenvolvida	Vagem com 2 cm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida.
R_5	Início do enchimento do grão	Grão com 3 mm de comprimento em vagem num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R_6	Grão cheio ou completo	Vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades da vagem de um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R_7	Início da maturação	Uma vagem normal no caule com coloração de madura
R_8	Maturação plena	95% das vagens com coloração de madura
R_9	Colheita	Maturação de colheita

Fonte: Fehr e Caviness (1977), Embrapa (2011).

3.2 Sistema de previsão de safra

A agricultura é uma atividade de elevado risco e significa incerteza. Riscos e incertezas são decorrentes tanto de instabilidades de origem climática e das ameaças sanitárias, assim como das oscilações do mercado. Uma adequada gestão de riscos agrícolas pode afetar positivamente a estabilidade financeira da atividade. No entanto, essa gestão mostra-se complexa, exigindo, dentre outros, boa capacidade gerencial, elevado conhecimento tecnológico e sobre tudo um alto nível de informações permanentemente atualizadas (GUIMARÃES; NOGUEIRA, 2009).

Dados de produção são quem definem ações governamentais a respeito do controle de exportações agrícolas, que mantêm o equilíbrio entre o abastecimento do mercado interno e a balança comercial. Essas informações são diretrizes para evitar o excesso ou a falta de produto, através do direcionamento dos financiamentos, que são um mecanismo de regulação da safra. Ações como esta visam evitar oscilações no mercado causadas pela oferta excessiva ou pela falta de produtos, que causam volatilidade diante da alta ou baixa nos preços (BARROS, 2006; 2011; SUMNER et al., 2010; MARTHA JUNIOR, 2010).

Atualmente, dados relacionados à produção são obtidas por meio de um sistema denominado LSPA (Levantamento Sistemático da Produção Agrícola), que fornece mensalmente informações referentes à estimativa de área plantada, a produtividade média e a produção de diversas culturas, a partir da fase de intensão de plantio até o final da colheita (IBGE, 2013b). Esse levantamento consiste em aplicações de questionários a órgãos ligados às atividades agrícolas (SANO et al., 1998).

Esta metodologia, no entanto não admite análise quantitativa de erros. O caráter grosseiro dos dados também impede visualizações de variações sutis que ocorrem ao longo do tempo, podendo omitir informações importantes. Em adição, a grande extensão territorial, aliada à dinâmica espaço-temporal da agricultura, torna a obtenção de informações lenta e laboriosa (PINO, 2001).

Técnicas ligadas ao geoprocessamento, como sistemas de navegação por satélite (GNSS) e sistemas de informação geográfica (SIG), reforçados por modelos de previsão, quando combinadas com tecnologias de sensoriamento remoto têm alto potencial no acompanhamento de safras (HATFIELD et al., 2008; SHUANGGEN; KOMJATHY, 2010).

3.2.1 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto se refere às atividades de observação e registro de objetos sem tocá-lo. O sensoriamento remoto é definido como ciência e tecnologia pela qual alvos podem ser identificados, mensurados e analisados sem o contato direto com os sensores (JENSEN, 2000). Isso é possível devido à informação espectral reportada pelas propriedades da luz devido a sua interação, como reflexão, transmissão e absorção pelo objeto. A radiação eletromagnética refletida ou emitida pelo alvo é a fonte de informação do sensoriamento remoto (JENSEN, 2000).

As vantagens oferecidas por esse sistema são as perspectivas espaciais em diferentes escalas (visão sinóptica), assim como o monitoramento de regiões remotas ou de acesso restrito, também a possibilidade de se obter imagens de áreas com intervalos regulares para avaliar as mudanças ocorridas (THENKABAIL et al., 2004; CAMBPELL et al., 2007; LI et al., 2010).

Essa tecnologia permite a identificação e o monitoramento do objeto alvo e de suas condições ambientais devido a sua singularidade das repostas espectrais. Assume-se que cada alvo (solos de diferentes tipos, água, rochas de diferentes origens ou vegetação de várias espécies) interage de maneira individual e característica com a radiação incidente, conhecido como “assinatura espectral”, a qual descreve o alvo por meio da sua resposta espectral (HUNT, 1977; JACQUEMOUD; BARET, 1990; FORMAGGIO; EPIPHANIO, 1990).

Se tratando de monitoramento de vegetação, a sua interação com a radiação eletromagnética está relacionada principalmente ao fator fotossíntese, processo este fundamentado na absorção da radiação eletromagnética por parte dos pigmentos fotossintetizantes como as clorofilas e carotenos (PONZONI, 2007; JENSEN, 2000).

As folhas são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado. As propriedades espectrais de uma folha são função de sua composição química, morfologia e estrutura interna. Na Figura 5 observa-se a curva espectral média da vegetação sadia. Observa-se que até 0,7 µm a refletância é baixa devido à absorção causada pelos pigmentos, com um pequeno aumento na faixa do verde (máximo em 0,56 µm).

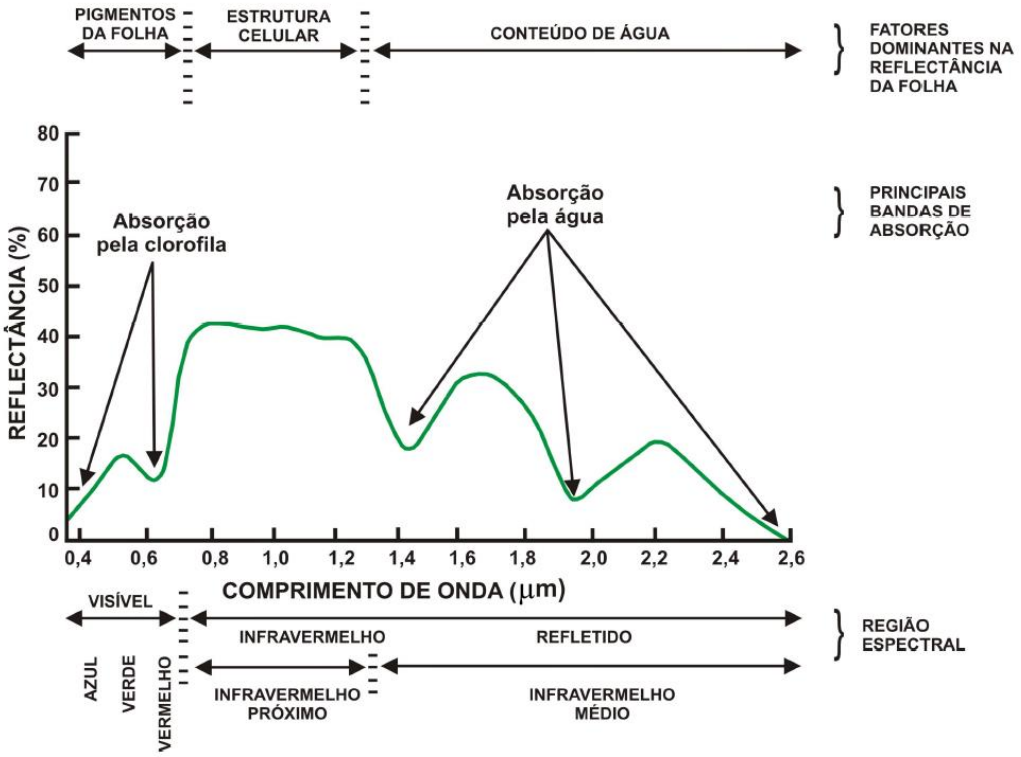


Figura 5 Assinatura espectral (média) da folha verde.
Fonte: Adaptado de Swain, et al. (1978).

De 0,7 µm a 1,3 µm a refletância é alta devido à interferência da estrutura celular do mesófilo esponjoso. Segundo Jensen (2000)**,** a refletância de quase toda radiação incidente, promovida pelo mesófilo esponjoso, faz parte de um mecanismo de controle de temperatura da planta. De 1,3 µm a 2,5 µm a influência maior é do conteúdo de água das folhas; a água possui como principal característica espectral a absorção da energia eletromagnética, principalmente nos comprimentos de 1,4 µm, 1,95 µm e 2,6µm, os quais apresentam picos de absorção (JENSEN, 2000).

No início do ciclo vegetativo, a cultura apresenta comportamento espectral semelhante ao solo, justamente por a cobertura vegetal do solo ser praticamente nula na

germinação. A cobertura aumenta à medida que a cultura cresce, diminuindo, assim, a influência do solo; logo, a curva de refletância tende a se ajustar ao comportamento das plantas verdes. Ao entrar em senescência, o vigor vegetal e o porte das plantas diminuem, reduzindo a porcentagem de cobertura e alterando o comportamento espectral da superfície, que volta ao padrão do solo. Para amenizar a influência do solo nos estudos de coberturas vegetais, são utilizados os índices de vegetação (ESQUERDO, 2007).

3.2.2 Índices de vegetação

Um dos principais fatores de interferência no uso de sensoriamento remoto é mapear áreas agrícolas com o mínimo de contaminação por outros alvos (FUNK; BUDDE, 2009). O índices de vegetação têm a finalidade de ressaltar a resposta espectral da vegetação em relação à resposta espectral de outros alvos, como, por exemplo, o solo (JACKSON, 1983).

A base do uso dos IVs no acompanhamento dos inúmeros processos que envolvem o ecossistema é que as propriedades da vegetação nas regiões do espectro eletromagnético visível e infravermelho servem como indicadores de vários processos biológicos e fisiológicos; no caso da soja, os estádios de desenvolvimento (JACKSON; HUETE, 1991)

Os índices de vegetação são combinações lineares das regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo (MOREIRA, 2000). Em virtude da densidade da cobertura vegetal, a maior oferta de pigmentos fotossintetizantes, a refletância no infravermelho próximo é maior, isso se deve ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética nas diferentes camadas de folhas, enquanto que na região do visível a absorção será maior devido à utilização desta faixa para os processos fotossintéticos da planta, apresentando, portanto, baixa refletância nesta região. Esse dinamismo, por sua vez, é explorado pelos índices de vegetação, que se caracteriza devido a esses contrastes de refletância e absorção (JACKSON et al., 1991; MYNENI et al., 1995). O propósito e a fundamentação de índices nestas duas regiões são em virtude do alto nível de refletância da vegetação (PONZONI et al., 2007).

Pela extensa aplicabilidade, existem vários índices de vegetação que vêm sendo elaborados e modificados, como, por exemplo, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), entre outros (PONZONI et al., 2007). O NDVI é o índice comumente utilizado para caracterizar mudanças sazonais da vegetação (FUNK; BUDDE, 2009; MKHABELA et al., 2011). Este índice foi proposto por Rouse et al. (1973) e, consiste em uma razão entre o infravermelho próximo e o vermelho, conforme Equação 1:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + \rho_{VER}} \qquad \text{Eq. (1)}$$

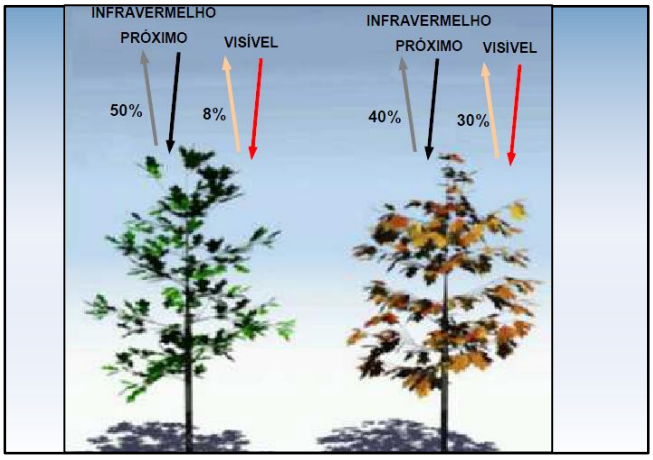
Em que:

NDVI - diferença normalizada do índice de vegetação;

ρ_{IVP} - refletância no infravermelho próximo;

ρ_{VER} - refletância no vermelho.

Em uma escala que varia de 0 a 1, a vegetação varia de 0,1 a 0,9, onde valores altos estão associados à maior vigor e densidade vegetal, valores menores que 0,2 geralmente são superfícies não-vegetadas**,** como solo nu. Plantas em estádio de emergência ou em senescência, superfícies com vegetação densa e sadia geralmente apresentam valores superiores a 0,6 (YIN et al., 1997). Este comportamento pode ser observado na Figura 6, considerando vegetação sadia e outra não-sadia ou em senescência.



$$NDVI = \frac{(0{,}50 - 0{,}08)}{(0{,}50 + 0{,}08)} = 0{,}72$$

$$NDVI = \frac{(0{,}40 - 0{,}30)}{(0{,}40 + 0{,}30)} = 0{,}14$$

Figura 6 Comportamento do NDVI de uma vegetação sadia (esquerda) e não sadia ou em senescência (direita).

Fonte: Adaptado de Esquerdo (2007).

3.2.3 Uso de perfis temporais de NDVI no estudo da vegetação

Os perfis temporais são resultados da variação do IV ao longo do tempo. Segundo Reed *et al*. (1994)**,** os perfis de NDVI mostram padrões temporais do desenvolvimento da vegetação, desde a sua semeadura à senescência (Figura 7).

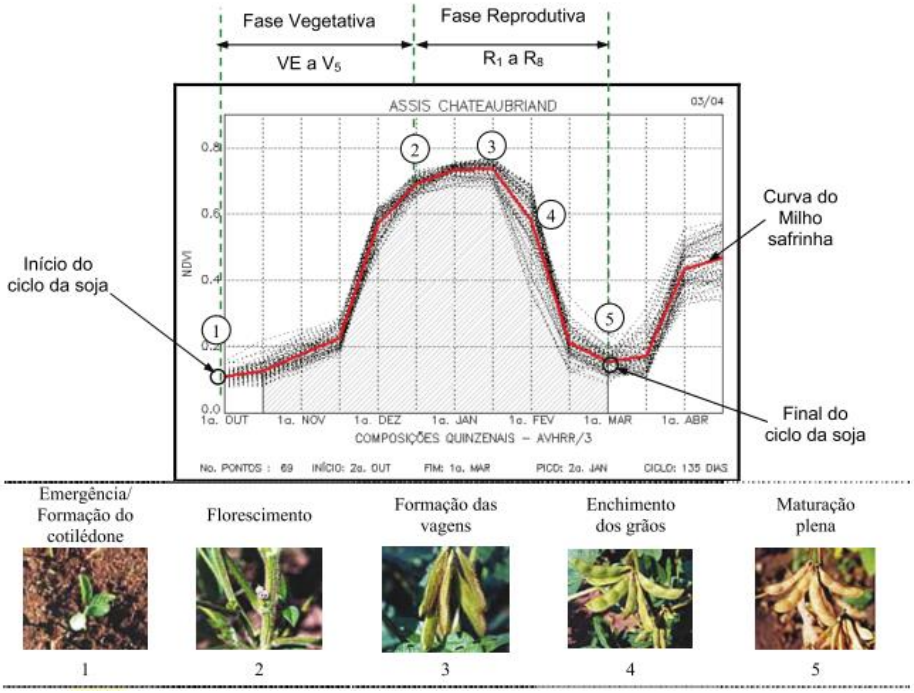


Figura 7 Perfil temporal do NDVI no município de Assis Chateaubriand – PR, na safra 03/04.

Fonte: Adaptado de Esquerdo (2007).

Vários trabalhos têm utilizado perfis temporais para monitorar o desenvolvimento de culturas. Parâmetros quantitativos podem ser obtidos a partir de perfis temporais de NDVI, informações como fenologia da cultura e ocupação do solo podem ser derivados desses parâmetros (HILL et al., 2003; JÖNSSON et al., 2004; JOHANN et al., 2009; ADAMI, 2010).

3.2.4 O sensores para medição de IV

Os itens 3.2.4.1 e 3.2.4.3 descrevem como os dados que compõem o NDVI são adquiridos e como são aplicados.

3.2.4.1 Sensor orbital

Registros do uso do sensoriamento remoto podem ser encontrados há mais de quatro décadas (KNIPLING, 1970). Os IVs, tais como NDVI, têm sido amplamente utilizados para mapeamento e monitoramento agrícola (LATORRE et al., 2007).

Dados de satélites como NOAA/AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration's – AdvancedVery High Resolution Radiometer*) são utilizados para o monitoramento e a previsão de safras em larga escala (ESQUERDO et al., 2009;

SUGAWARA, 2001; BERKA et al., 2003). Recentemente, pesquisas relacionadas ao monitoramento e à previsão de safra utilizam o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), o qual possui calibração radiométrica mais aprimorada e conta também com resolução espectral e espacial superiores ao AVHRR (NASA, 2014; NOAA, 2014).

Ambos AVHRR e MODIS fornecem dados de alta resolução temporal; contudo, as resoluções espaciais são grosseiras. Para o MODIS**,** as imagens estão disponíveis em resoluções espaciais de 250m, 500m e 1000m, isso dependendo do produto (NASA, 2014). Em contrapartida, as imagens do AVHRR estão disponíveis em resoluções de 1100m e 4000m (NOAA,2014).

Trabalhos com sensores de média resolução espacial (30m)**,** como Landsat TM**,** também podem estar relacionados a aplicações de monitoramento (RUDORFF; BATISTA, 1991). Porém, a resolução temporal deste sensor é relativamente baixa (16 dias), o que acaba se tornando um empecilho para aplicações agrícolas, que dependem de dados mais frequentes durante os períodos críticos do desenvolvimento das culturas. Trabalhos recentes têm agregado informações de sensores de alta resolução espacial derivados por exemplo do Landsat com dados de alta resolução temporal**,** como MODIS, AVHRR e SPOT (ESQUERDO et al., 2009; JOHANN et al., 2009).

3.2.4.2 Sensor não-orbital

As dificuldades encontradas no uso do sensoriamento orbital, que apesar da grande área de abrangência, apresentam indisponibilidades de dados por fatores climáticos**,** assim como informações duvidosas. Tal fato orientou a pesquisa a buscar *in situ* informações complementares para validar os dados obtidos por satélites (CHENG et al., 2006).

Medições a campo intensivas e contínuas são necessárias para se obter um conhecimento aprimorado dos fatores que atuam sobre as mudanças espaciais e temporais das propriedades de refletância do solo e da vegetação, o que envolve uso de sensores como espectroradiômetros portáteis (THENKABAIL et al., 2000).

Segundo Baghzouz *et al.* (2010)**,** o uso de sensores de solo, espectroradiômetros portáteis, não é considerado prático. Apesar da alta resolução espectral, são sensores passivos e dependerem da radiação solar, o que faz com que as leituras variem ao longo do dia. Esta variação impede que leituras de grandes áreas, como a correspondente a um *pixel* de satélite, sejam tomadas ao mesmo tempo. Umas das alternativas para esse problema são torres, onde os equipamentos são montados e programados para operar automaticamente sob diversas condições climáticas (GAMON et al., 2006; HILKER et al., 2007).

Recentemente foi introduzida ao mercado a tecnologia de sensores ópticos ativos, considerada mais barata e capaz de atender à necessidade desse segmento. Os sensores ativos são utilizados para recomendação de nitrogênio baseados no IV (CLAY et al., 2006). Por ser ativo, este equipamento coleta a refletância dos alvos independente das condições de luminosidade, sendo uma vantagem em relação a sensores terrestres típicos, como espectroradiômetros, passivos, que necessitam da luz solar (NTECH INDUSTRIES, 2008).

MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em dois talhões (T1 e T2) de área agrícola localizada nas dependências da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (COODETEC) (Figura 8), no município de Cascavel, região Oeste do Paraná. O clima da região é classificado como subtropical mesotérmico, segundo a classificação de Köppen, caracterizado como Cfa – Clima subtropical (Caviglione et al., 2000), com temperatura anual média de 19,6°C com precipitação anual de 1971 mm (LUNELLI, 2012). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 2006).

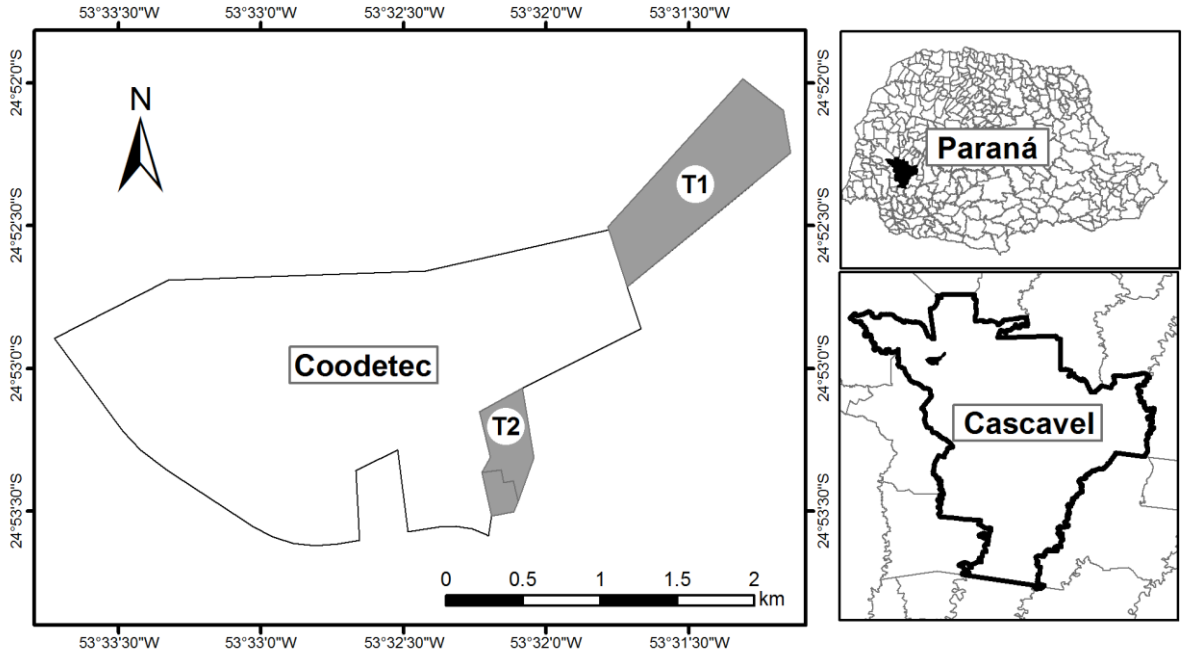


Figura 8 Mapa de localizaçãoda área experimental, com indicação dos talhões (T1 e T2), localizados nas dependências da Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (COODETEC).

Por se tratar de um órgão de pesquisa, conta com completa infraestrutura para suporte ao presente estudo, desde a área à mão de obra técnica para implantação da cultura, e até mesmo relatórios periódicos sobre o estado da mesma.

Os talhões T1 e T2 foram escolhidos por atenderem os requisitos mínimos exigidos, descritos a seguir. No caso sensoriamento orbital (satélite), um dos requisitos é que o talhão possua área maior ou igual ao *pixel* da imagem, o qual possui área aproximada de 6,25 ha e dimensões aproximadas de 250 x 250 m, de acordo com as especificações do sensor descrita

no item 3.3.4.1. Esse requisito é imprescindível, uma vez que o valor do *pixel é* a média da resposta espectral da área observada dos alvos. Desta forma**,** o sensor exige uma área mínima para registro da resposta espectral sem a eventual interferência de alvos vizinhos. Outro requisito é que as áreas sejam cultivadas com soja, o objeto de estudo.

No talhão T1**,** com área de 58,80 ha, utilizado pela empresa como campo de reprodução de sementes, foram implantadas 13 cultivares de soja, como pode-se observar no esquema da Figura 9a.Outro detalhe a ser considerado é a segmentação da semeadura, o que resulta na diferença de idade das plantas e**,** como consequência**,** maior heterogeneidade da área. O talhão T2 foi semeado com apenas um cultivar; porém**,** do total de 18,10 ha da sua área**,** apenas 13,80 ha são soja, o restante da área é milho (Figura 9b).

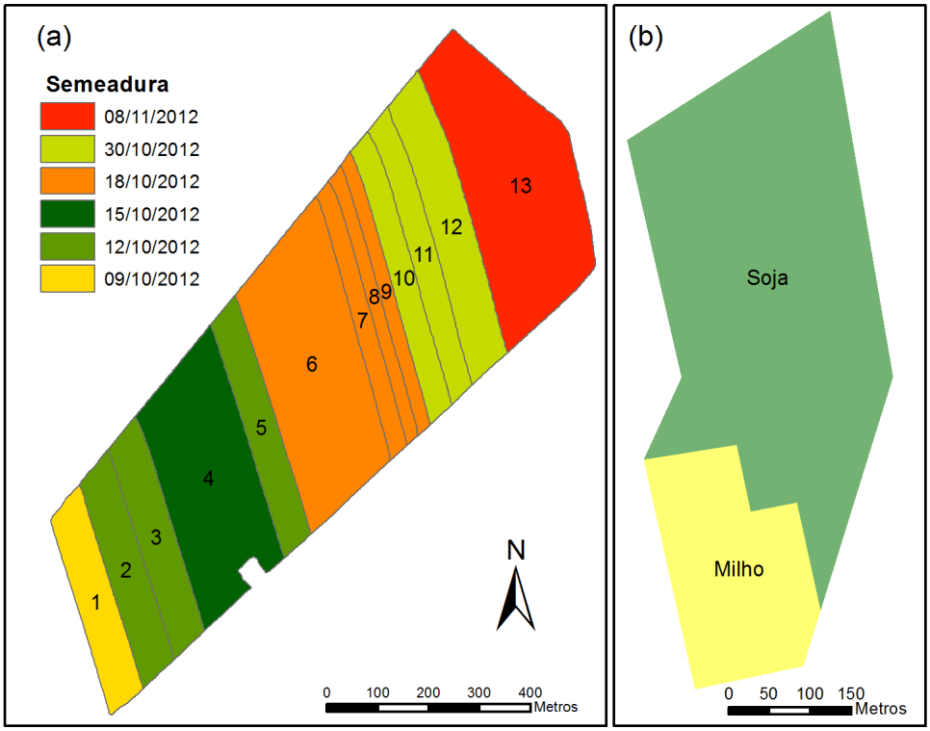


Figura 9 Esquema de distribuição das cultivares implantada no talhão T1 agrupadas pela data de semeadura (a); talhão T2 (b).

3.2 Dados de precipitação

De acordo com Doorenbos e Kassan (1979), para que ocorra o desenvolvimento normal da soja e uma boa produtividade de soja alcançada, as necessidades hídricas da cultura devem ser atendidas. Durante seu ciclo**,** a soja exige entre 450-800 litros de água m^{-2}. A exigência hídrica varia de acordo com o estádio da cultura. A necessidade máxima se dá na floração e no enchimento de vagens, sendo necessários um volume disponível de 7 a 8

mm dia^{-1}; entretanto**,** a disponibilidade de água é fundamental no período de germinação-emergência (BERLATO et al., 1986). De acordo com EMBRAPA (2008), o déficit hídrico combinado a altas temperaturas, próximas a 40°, antecipam a floração e**,** consequentemente**,** reduzem o ciclo.

Os dados de precipitação foram obtidos de uma estação meteorológica do SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), localizada dentro das dependências da Coodetec. Os valores diários foram transformados em precipitação acumulada por períodos de 16 dias. Esse intervalo foi fixado baseado no intervalo em que as imagens orbitais (MODIS) são disponibilizadas.

3.3 Dados orbitais

Para dados orbitais foram utilizadas imagens do sensor MODIS, disponíveis em diversos bancos de dados *online*, como por exemplo, a EMBRAPA(2013).A obtenção destas imagens sem custo facilita o desenvolvimento de metodologias de monitoramento de safras através da incorporação das informações obtidas por sensoriamento remoto.

A bordo dos satélites Terra e Aqua**,** o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) registra 36 bandas espectrais, desde o visível até o infravermelho termal. Este sensor possui resolução espacial de 250 m nas bandas vermelho e infravermelho, resolução radiométrica (níveis de cinza) de 16 bits (MODIS, 2013). Algumas bandas do sensor MODIS captam informações para posterior correção da interferência atmosférica (VERMOTE et al., 1999).

Uma das características mais importantes deste sensor é a resolução temporal: as imagens são adquiridas diariamente, o que aumenta a probabilidade de *pixels* livres de nuvens; no entanto**,** as imagens são fornecidas como composições de 16 dias. As imagens utilizadas para gerar o NDVI são compostas por bandas (faixas do espectro eletromagnético) localizadas entre os comprimentos de onda de 620 – 670 (vermelho) e 841 – 876 (MODIS, 2013). A imagem, produto da matemática de bandas (Equação1) utilizada para calcular o NDVI, leva o nome de MOD13Q1 (NASA, 2013).

A partir das datas de semeadura, as imagens adquiridas para safra são do período entre 16/11/2012 e 06/03/2013 para T1 e entre 02/12/2012 e 06/03/2013 para T2, com intervalo de 16 dias, totalizando oito imagens para T1 e sete imagens para T2. Os *pixels* de interesse foram obtidos através da sobreposição entre o vetor dos talhões e as imagens. O resultado da sobreposição são 11 *pixels* para T1 e dois *pixels* para T2 (Figura 10).

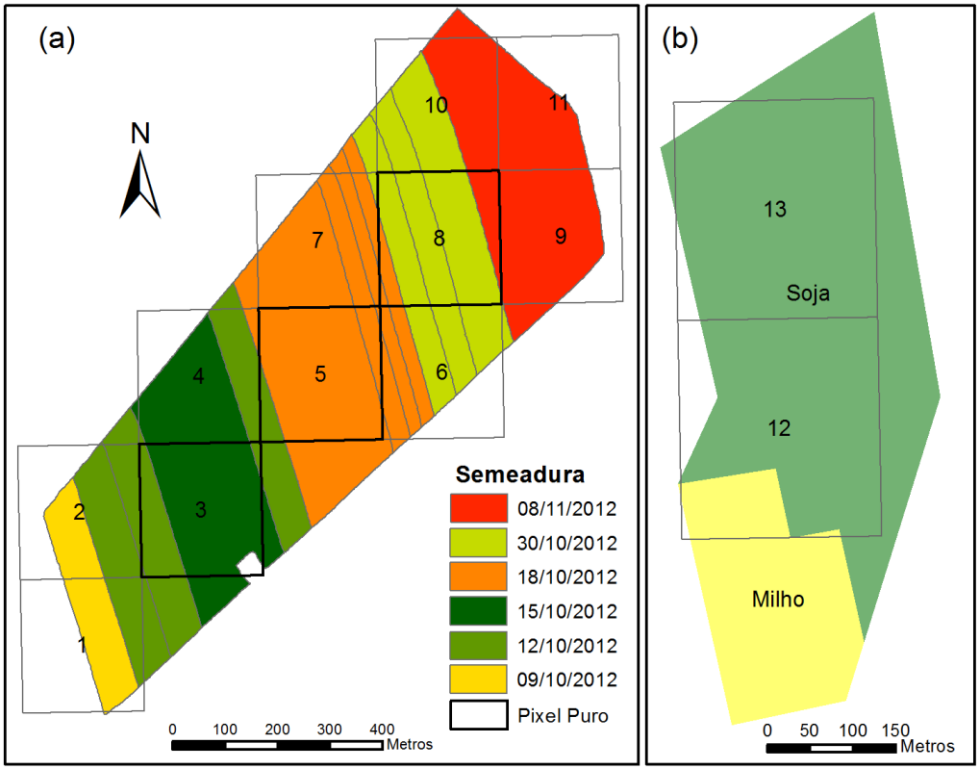


Figura 10 Distribuição de *pixel*s com destaque para *pixel*s puros referentes à T1(a) e a distribuição de *pixel*s referentes a T2(b).

Como pode ser observado no esquema da Figura 10a, dos 11 *pixels* que cobrem T1 apenas três podem ser considerados como puros (com toda sua extensão ocupada por soja), o restante tem sua área parcialmente comprometida pelos limites do talhão. Quanto ao talhão T2, foram considerados dois *pixels*. No entanto**,** como pode se observar (Figura 10b), o *pixel 13* tem suas extremidades fora dos limites do talhão. O mesmo ocorre com o *pixel 12*, que além de extrapolar os limites do talhão, está parcialmente sobre uma área de milho.

Os procedimentos de extração do NDVI foram operacionalizados por rotinas desenvolvidas em linguagem IDL. Este sistema**,** desenvolvido por Esquerdo (2007), extrai o NDVI armazenado em cada *pixel* a partir da sua localização informada em coordenadas geográficas. Para isto, os *pixels* de interesse tiveram suas posições determinadas a partir de seus centroides, com o auxílio do software ArcGIS10.

3.4 Dados não-orbitais

O sensor utilizado para medição e registro de dados a campo foi o GreenSeeker Hand Held™ (NTECH INDUSTRIES, Ukiah, CA) (Figura 11).

Figura 11 Sensor ótico GreenSeeker Hand Held™ RT100.
Fonte: NTech Industries (2008).

Por ser um sensor ativo**,** este equipamento emite radiação eletromagnética. Os comprimentos de ondas emitidos correspondem às regiões do espectro eletromagnéticos correspondente aos comprimentos de onda do vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (780 nm), com uma largura de banda de 25 nm.

De acordo com a NTech, empresa que desenvolveu o equipamento, o sensor é capaz de realizar medições do NDVI estando posicionado a uma altura ótima de 0,80 a 1,20 m acima do dossel, sem que haja variações significativas no índice de vegetação. Além disso, nesta altura o aparelho possui largura de trabalho, denominada FOV (*Field of View*), de aproximadamente 0,60 m (Figura 12).

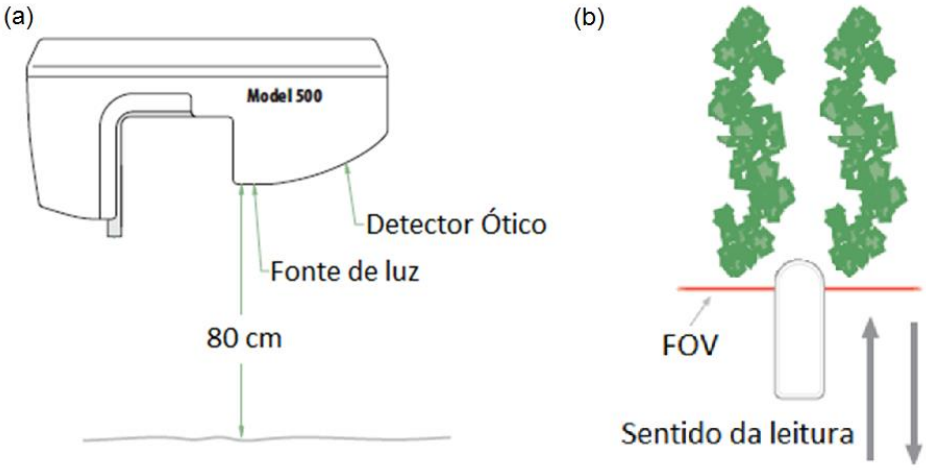


Figura 12 Detalhamento de sensor e altura de trabalho (a), posição e sentido do sensor na tomada de leitura e largura de trabalho (FOV) (b).
Fonte: NTech Industries (2008)

Seguindo as recomendações do fabricante, o sensor foi posicionado a 0,80 m acima do dossel. Foram percorridos 10 m lineares a uma velocidade média de 0,5 $m.s^{-1}$. O equipamento foi posicionado de maneira que a leitura fosse obtida sobre duas linhas espaçadas por 45 cm entre si.

O sensor registra 10 leituras por segundo. Considerando a velocidade e a distância percorrida, os arquivos gerados em cada amostra contêm cerca de 150 a 200 leituras. A grade amostral foi gerada estrategicamente para que cada *pixel* tivesse uma amostra composta por pelo menos cinco subamostras (repetições), identificadas pelas letras A, B, C, D e E (Figura 13).

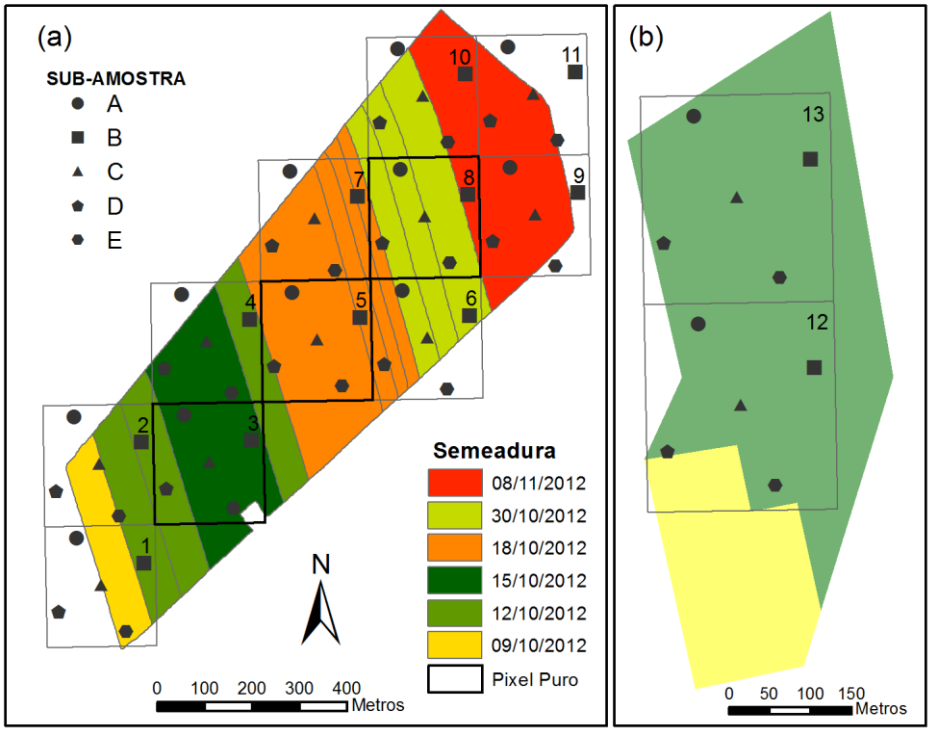


Figura 13 Grade amostral das leituras tomadas com o sensor GreenSeeker® para talhão T1 (a) e talhão T2 (b).

Os *pixels* impuros em T1, cuja área excedia os limites do talhão, tiveram o número de repetições das leituras restringido para as subamostras que se encontravam fora dos limites da área. Apenas os *pixel*s puros 3, 5 e 8 (Figura 13a) obtiveram o total de cinco repetições cada.

A frequência de coleta foi baseada em um intervalo de 16 dias, em que as imagens do sensor MODIS são disponibilizadas; contudo como pode ser observado**,** na Tabela 2, que os intervalos entre coletas foram irregulares em função de alguns fatores que impediam a visitação da área, como: chuva, disponibilidade de equipamentos e riscos a saúde, fornecidos pelas aplicações de defensivos.

Tabela 2 Data das coletas de dados não-orbitais e intervalo entre coletas

Data da Coleta	**16/11/12**	**06/12/12**	**20/12/12**	**26/12/12**	**10/01/13**	**28/01/13**	**05/02/13**	**23/02/13**
Intervalo (dias)	--	20	14	6	14	18	8	18

Na Tabela 2 tem-se as datas nas quais foram efetuada as coletas a campo e o respectivo intervalo entre cada coleta. As coletas foram realizadas no mesmo dia em ambos os talhões, exceto a primeira, ocorrida no dia 16/11/12, pois o talhão T2 ainda estava em fase de germinação.

Uma vez que existiram várias datas de semeadura, chegando a um intervalo de um mês entre a primeira e a última (Figura 10a), e sabendo que as datas de coleta de dados foram as mesmas para todas as cultivares, foi necessária a divisão do talhão T1 em grupos de semeadura para verificar o efeito de cultivar e da data de amostragem nos índices NDVI obtidos com o sensor não-orbital. Cada grupo foi composto por cultivares com datas de semeadura próximas (Tabela 3). Foram utilizadas duas subamostras (repetições) por cultivar. Nas cultivares que possuíam mais que duas subamostras, estas foram escolhidas por meio de sorteio.

Tabela 3 Grupos de semeadura, cultivares e pixels utilizados para Análise de Variância

Grupo	**Semeadura**	**Cultivar**	***Pixel***
G1	09/10/2012	C1	1E; 2C
	12/10/2012	C2	1B; 2E
		C3	2B; 3D
		C5	4B; 5D
G2	15/10/2012	C4	3C; 4E
	18/10/2012	C6	5C; 7E
		C7	5B; 6D
		C9	7B; 8D
G3	30/10/2012	C10	6A; 6C
		C11	8A; 10D
		C12	8E; 10C

3.5 Análise dos dados

Os dados de NDVI obtidos com o sensor não-orbital GreenSeeker® foram submetidos a análise exploratória por meio de estatísticas descritivas, permitindo a visualização do seu comportamento por medidas de tendência central, de dispersão e boxplot.

O efeito dos fatores cultivar e data de amostragem sobre os índices NDVI obtidos com o sensor não-orbital GreenSeeker® foram verificados em cada grupo de semeadura por meio de Análise de Variância – ANOVA, sob delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial duplo. Quando constatado efeito do fator ou interação significativa entre os fatores, foi utilizado teste de comparação de médias Tukey a 5% de significância. A ANOVA e o teste de comparação de médias foram conduzidas com o auxílio do *software* SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2000).

Para comparação dos dados obtidos com os sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®), foi utilizado teste t-Student, que determina a significância estatística entre as diferenças das médias de NDVI. O teste assume a hipótese nula (H0), de que os dois grupos de dados são independentes, com distribuições normais e média e variâncias iguais, porém desconhecidas. A hipótese nula é testada contra a hipótese alternativa (H1), que assume que as médias são diferentes. Neste caso, a não-rejeição da H0 pelo teste significa que a média do NDVI obtida com o GreenSeeker® não se diferencia da média do MODIS, caso H0 seja rejeitado**,** temos que as médias são diferentes, a 5% de significância. Foram comparados os dados de NDVI do sensor orbital, referentes aos *pixels* puros (*pixel 3, pixel 5 e pixel 8*) em relação à média das leituras obtidas entre as cinco repetições para o respectivo *pixel*, com o sensor não-orbital.

A Tabela 4 apresenta as datas nas quais os dados não-orbitais foram obtidos e também as datas das imagens utilizadas referentes ao sensor orbital. Para o sensor orbital são apresentadas as datas do primeiro dia das composições diárias que dão origem ao produto MOD13Q1. Portando**,** as datas das imagens não necessariamente indicam a data em que os dados foram obtidos, pois a data de obtenção de cada *pixel* pode variar em um período de 16 dias, a partir da data indicada (Tabela 4). As datas referentes aos *pixels* comparados foram obtidas a partir da imagem auxiliar *composite day of the year* disponibilizado junto com o produto MOD13Q1.

Tabela 4 Relação de datas correspondentes à obtenção dos dados não-orbitais e do primeiro dia da composição de 16 dias do sensor orbital

Sensor	**Datas**							
Não-orbital	16/11/12	06/12/12	20/12/12	26/12/12	10/01/13	28/01/13	05/02/13	23/02/13
Orbital	16/11/12	02/12/12	18/12/12	18/12/12	01/01/13	17/01/13	02/02/13	18/02/13

O teste t-Student para a comparação dos índices obtidos com os sensores orbital e não-orbital foi conduzido com auxílio do programa MATLAB versão 7.12. R2011a (MATHWORKS, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados NDVI obtidos com sensor não-orbital

Como a largura do campo de visada do sensor (FOV) corresponde a 60 cm, no início da fase de crescimento, quando área de solo ainda predomina sobre área de cobertura do dossel, cerca de 45 cm do campo de visada obteve dados do solo, e os cerca de 15 cm restantes obteve leituras referentes ao dossel. À medida que a cultura se desenvolveu, a fração de solo exposto foi reduzindo, até desaparecer sob a cobertura do dossel.

Os dados obtidos por este sensor, representados pela linha tracejada na Figura 14, apresentam um comportamento temporal do índice típico para cultura da soja, assim como apresentados por Esquerdo (2007). A curva que se inicia com valores mais baixos de NDVI, aumenta à medida que o solo descoberto no início do desenvolvimento da vegetação vai dando lugar à soja. Com o desenvolvimento da cultura e o crescimento vegetativo, a quantidade de biomassa aumenta, os valores de NDVI sobem até o pico vegetativo, onde o NDVI atinge o seu valor máximo. Após o estádio reprodutivo a planta entra em maturação e os valores de NDVI caem até a senescência.

A Figura 14 a seguir traz os boxplot com a distribuição empírica dos dados obtidos com o sensor GreenSeeker® para um *pixel*, ou seja,cada boxplot representa a amostragem, considerada para o *pixel* como um todo.O perfil temporal de NDVI, representado pela linha tracejada, foi obtido a partir da média das leituras obtidas em cada data amostrada ao longo do tempo.Os boxplot exibem informações estatísticas acerca do conjunto de leituras obtidas com o GreenSeeker® nos cinco pontos amostrais referentes ao *pixel*. Em cada caixa (retângulo), a linha central refere-se à mediana, o topo e a base da caixa são os percentis 25% e 75%, os traços horizontais são a extensão dos pontos mais extremos (mínimo e máximo) não considerados discrepantes (*outliers*), os pontos discrepantes**,** por sua vez**,** estão representados individualmente pelo símbolo “+”. Assim como descrito anteriormente (item 4.4)**,** cerca de 150 a 200 leituras foram obtidas, ao longo de 10 metros lineares, para cada um dos cinco pontos amostrais referentes a um *pixel* (Figura 13). Portanto, dentre esses cinco pontos amostrais presentes no *pixel,* foram obtidas por volta de 750 a 1030 leituras (Tabela 5). Os resultados apresentados na Figura 14 são referentes ao *pixel* 13, localizado no talhão T2. A primeira série de dados neste *pixel* foi tomada 26 dias após a semeadura, quando as plantas apresentavam estádio vegetativo V4 e um dossel expressivo**,** como pode ser observado na Figura 15a.

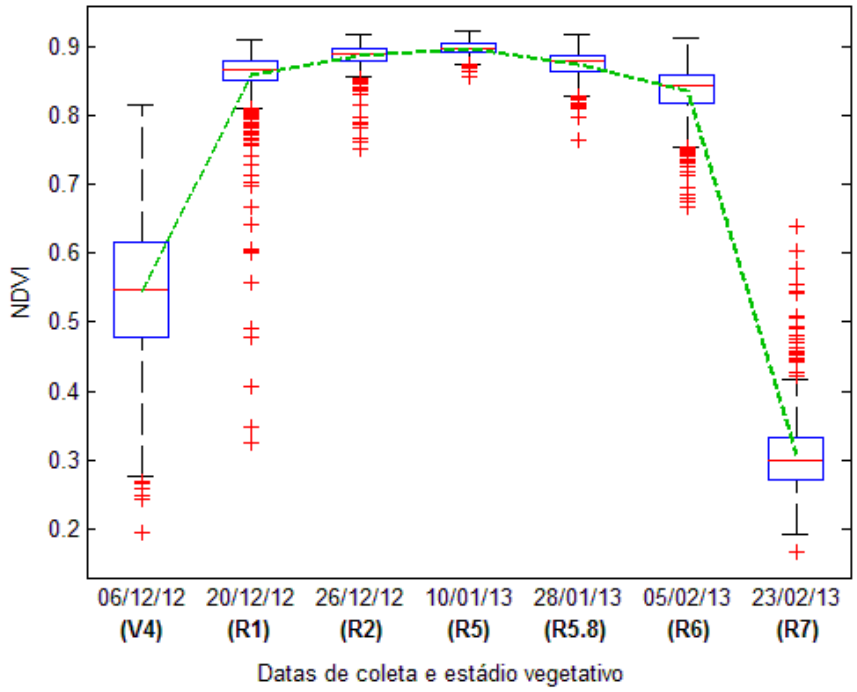


Figura 14 Perfil temporal demédio de NDVI e boxplot dos dados nas respectivas datas de coleta, e informações sobre a fenologia da soja.

De acordo com a Tabela 5, as leituras do estádio inicial (V4) da cultura, tomadas dia 06/12/12**,** apresentam grande dispersão, com valores de NDVI variando aproximadamente entre 0,20 e 0,82. A causa desse comportamento pode ser atribuída às proporções de solo e vegetação presentes na área observada pelo sensor. De acordo com a Figura 15a, apesar da soja em estádio V4 apresentar um dossel expressivo, uma parte do solo ainda se encontra descoberto pela vegetação. Os baixos valores ocorrem devido à presença de alvos como solo e palhada, que apresentam NDVI baixo, e os valores mais altos podem ser atribuídos à fração de vegetação, que apresenta NDVI mais alto.

Tabela 5 Análise exploratória dos dados de NDVI obtidos com o sensor não-orbital (GreenSeeker®) referentes ao *pixel* 13, e os estádios vegetativos nas referidas datas de coleta

Estatísticas	**06/12/12 (V4)**	**20/12/12 (R1)**	**26/12/12 (R2)**	**10/01/13 (R5)**	**28/01/13 (R5.8)**	**05/02/13 (R6)**	**23/02/13 (R7)**
n	1028	1028	781	1006	1017	1022	982
Mínimo	0,20	0,33	0,75	0,86	0,76	0,67	0,17
Média	0,54	0,86	0,89	0,90	0,88	0,84	0,31
Mediana	0,55	0,87	0,89	0,90	0,88	0,84	0,30
Máximo	0,82	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,64
DP	0,10	0,05	0,02	0,01	0,02	0,04	0,05
CV(%)	18,82	5,36	1,95	1,04	2,08	4,19	17,31

Nota: n = número de observações; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; MODIS = médias referentes ao sensor MODIS.

ATabela 6apresentavalor de NDVI de uma vegetação densa, cujo valor é médio de NDVI observado foi 0,92,enquanto que leituras tomadas sobre solo exposto e solo com palhada o NDVI médio obtido foi cerca de 0,15,bem inferior aos valores referentes a vegetação. Nota-se que apesar das refletâncias,entre as condições de palhada e solo exposto serem diferentes nos comprimentos do vermelho e infravermelho, 0,14 e 0,19 para solo exposto 0,28 e 0,37 para palhada respectivamente, o NDVI entre ambos (0,14 e 0,15) é semelhante.

À medida que o volume do dossel aumentou, os valores de NDVI também aumentaram, seguido de uma diminuição na dispersão dos dados. Isso é decorrente do fato de a área observada pelo sensor agora apresentar maior proporção de vegetação do que solo. Em R1**,** por exemplo**,** pode-se observar através da Figura 15b que dossel já está bem desenvolvido, no entanto pequenas aberturas ainda permitem a visualização do solo pelo sensor, cujos valores de NDVI são provavelmente os apresentados como discrepantes (Figura 14).

Tabela 6 Valores obtidos de NDVI e da refletância nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo dos alvos vegetação densa, soloexposto e solo com palha.

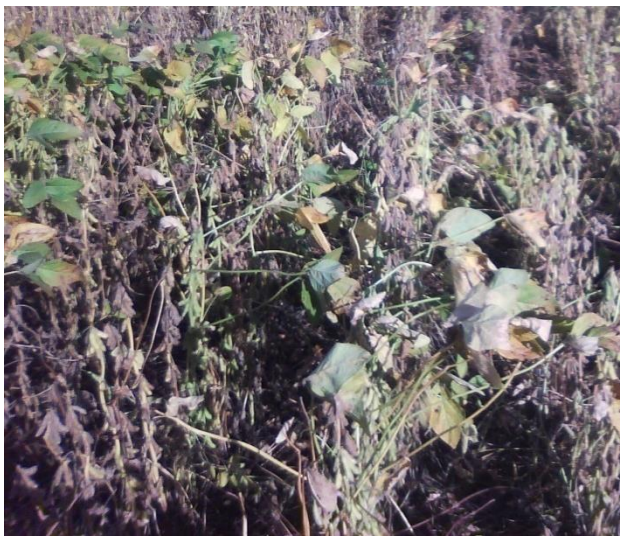
TIPO DE COBERTURA	**Vermelho**	**Infravermelho próximo**	**NDVI**
Vegetação densa	0.02	0.59	0.92
Solo exposto	0,14	0,19	0,14
Solo com palha	0,28	0,37	0,15

Em algumas fases o perfil temporal demonstra um comportamento de mudança abruta do índice, como**,** por exemplo o intervalo no início do ciclo, entre 06/12/12(V4) e 20/12/12 (R1), onde o NDVI médio passou de 0,55 para 0,87 em um período de 14 dias. Esse comportamento também é verificado no final do ciclo, entre 05/02/13 (R6) e 23/02/12 (R7), quando o NDVI médio passou de 0,84 para 0,31 em um intervalo de 18 dias.

Entre o intervalo de 47 dias entre 20/12/12 e 05/02/13**,** a curva do NDVI apresentou um patamar devido ao seu comportamento estável, quase que estacionário, sem variações expressivas como os períodos restantes. Na Tabela 5**,** é possível verificar que**,** para este período, entre os estádios R1 e R6, as médias oscilaram muito pouco, os valores de NDVI se mantiveram entre 0,84 (R6) à 0,90 (R5), com valores de desvio padrão variando entre 5,36% (R1) e 1,04% (R5). Outro ponto em comum foi a redução na dispersão dos dados, contrastando com a data de coleta inicial de 06/12/12**,** onde o NDVI médio registrado foi 0,54**,** contrastando também com a data de coleta final de 23/02/13, quando o NDVI médio foi 0,31(Figura 14).

(a)- 06/12/12(V4) (b)- 20/12/12 (R1)

(c) - 10/01/13 (R5) (d) - 28/01/13 (R5.8)



(e) - 23/02/13 (R7)

Figura 15 Fotografias obtidas na área referente ao *pixel 13*, representando o aspecto da cultura em diferentes estádios de desenvolvimento.

Segundo Thenkabail et al. (1997), o NDVI está sujeito a “saturação”, a qual pode causar uma estabilização súbita na curva, fazendo com que os valores do índice não representem o comportamento real da cultura. Segundo o autor, a explicação aceita para a saturação é que na densa vegetação, a cobertura de folha já se aproxima de 100%, enquanto que a biomassa e o índice de área folia (IAF) continuam aumentando. Quando a cobertura de folha atinge 100%, informações acerca das porções mais inferiores do dossel são omitidas, devido à interferência das camadas superficiais do dossel. Normalmente, as culturas alcançam 100% de cobertura de dossel em meados da fase vegetativa.

Contudo, Pederson e Lauer (2004) afirmam que, em condições normais de desenvolvimento, após alcançada a fase reprodutiva (R1), em que, nesse caso, o patamar se inicia, a cultura não apresenta mudanças significativas no seu aporte físico. Essa conjectura pressupõe que a ausência de informações nas porções inferiores do dossel não se reflete em perdas expressivas de informação.

Nas Figuras 16a, b, c, d, são apresentados os boxplot referentes às subamostras “A”, “B”, “C”, “D”, “E”, que compõem a amostra referente ao *pixel* 13 (Figura 16f). Os gráficos, com exceções de pequenas variações, como, por exemplo, os dados referentes à subamostra “B” em 20/12/12 (Figura 16b), que apresentam maior dispersão nos dados, além de valores com maior discrepância em relação às outras subamostras. A homegeneidade entre as subamostras deste *pixel* é esperada, uma vez que todas as leituras são oriundas da mesma cultivar.

No caso do *pixel 13*, foi verificado que o sensor obteve resultados semelhantes entre subamostras, com características visuais homogêneas. A capacidade de obter resultados sem grandes variações, em uma área tida como homogênea por apresentar uma única cultivar, pode vir a excluir a hipótese de inconsistências das leituras, causadas por problemas de calibração do sensor.

Contudo, a área de um *pixel*, mesmo que ocupada com uma única cultivar,pode vir a apresentar variações entre as leituras das subamostras como é o caso do *pixel 12* (Figura 17). A subamostra C (Figura 17c), localizada no centro do *pixel*, apresentou clara diferença em relação às amostras localizadas nas extremidades do *pixel* A, B, D e E (Figuras 17a, 17b,17d e 17e), nas leituras obtidas em 23/02/13. As subamostras A, B, D e E, localizadas nas margens do *pixel*, apresentaram maior dispersão nos dados quando comparadas à subamostra C, mais centralizada.

Partindo-se do pressuposto que essas variações não são oriundas do equipamento, presume-se que possam ser originárias das plantas. As diferenças nas repostas espectrais das plantas podem ser fruto da variação da fertilidade (MONTEZANO et al., 2006) e dos atributos físicos do solo (JOHANN et al., 2004; SOUZA et al., 2004). As propriedades químicas e físicas do solo podem influenciar no vigor da planta e, por consequência, na sua resposta

espectral; portanto, a variação desse fator pode fazer com que a resposta espectral de uma área seja variável.

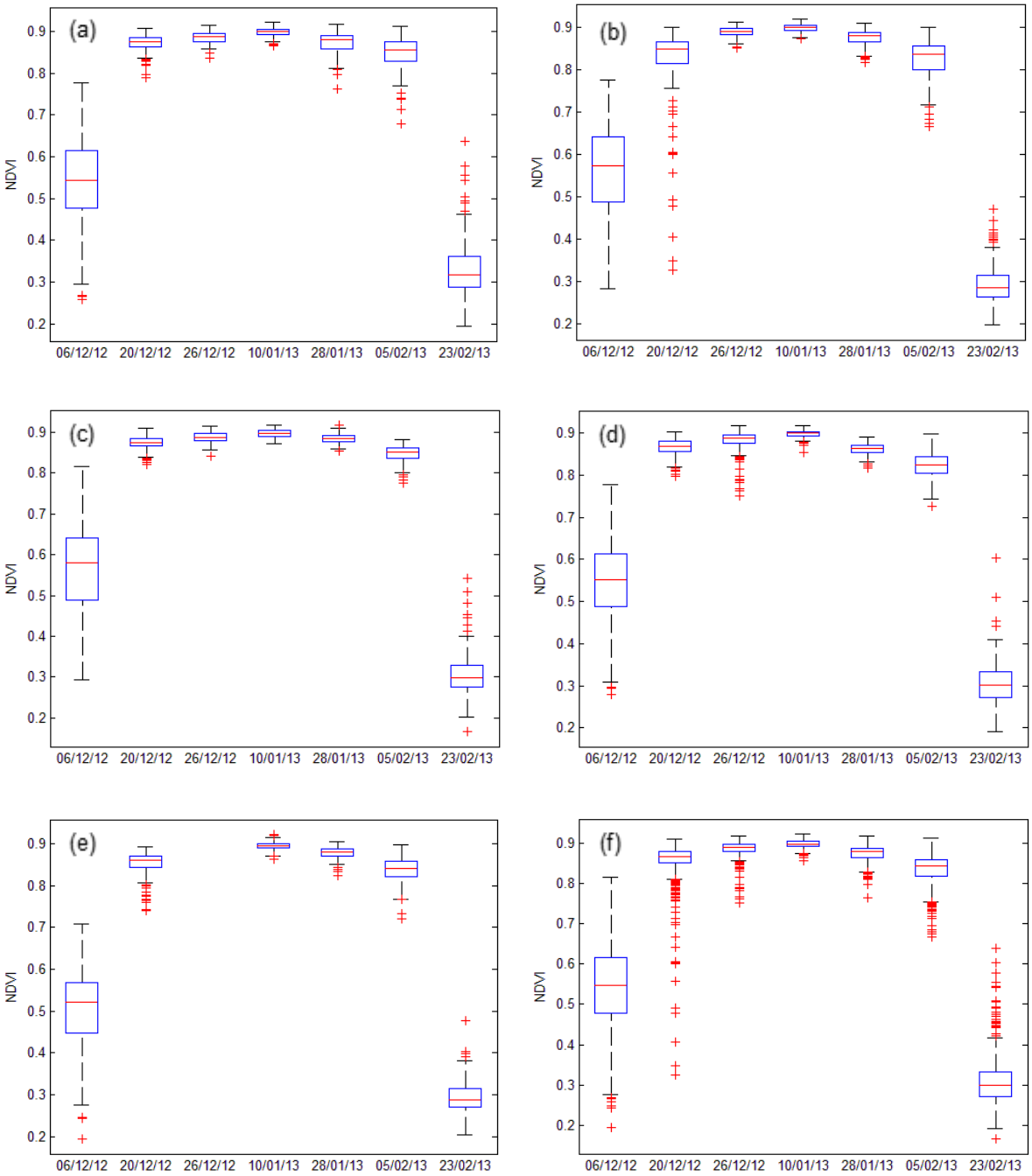


Figura 16 Boxplot dos dados de NDVI para o período avaliado, obtidos para cada subamostra A(a), B(b), C(c), D(d), E(e), e do conjunto de dados formado a partir do agrupamento das subamostras (f), referente ao *pixel* 13.

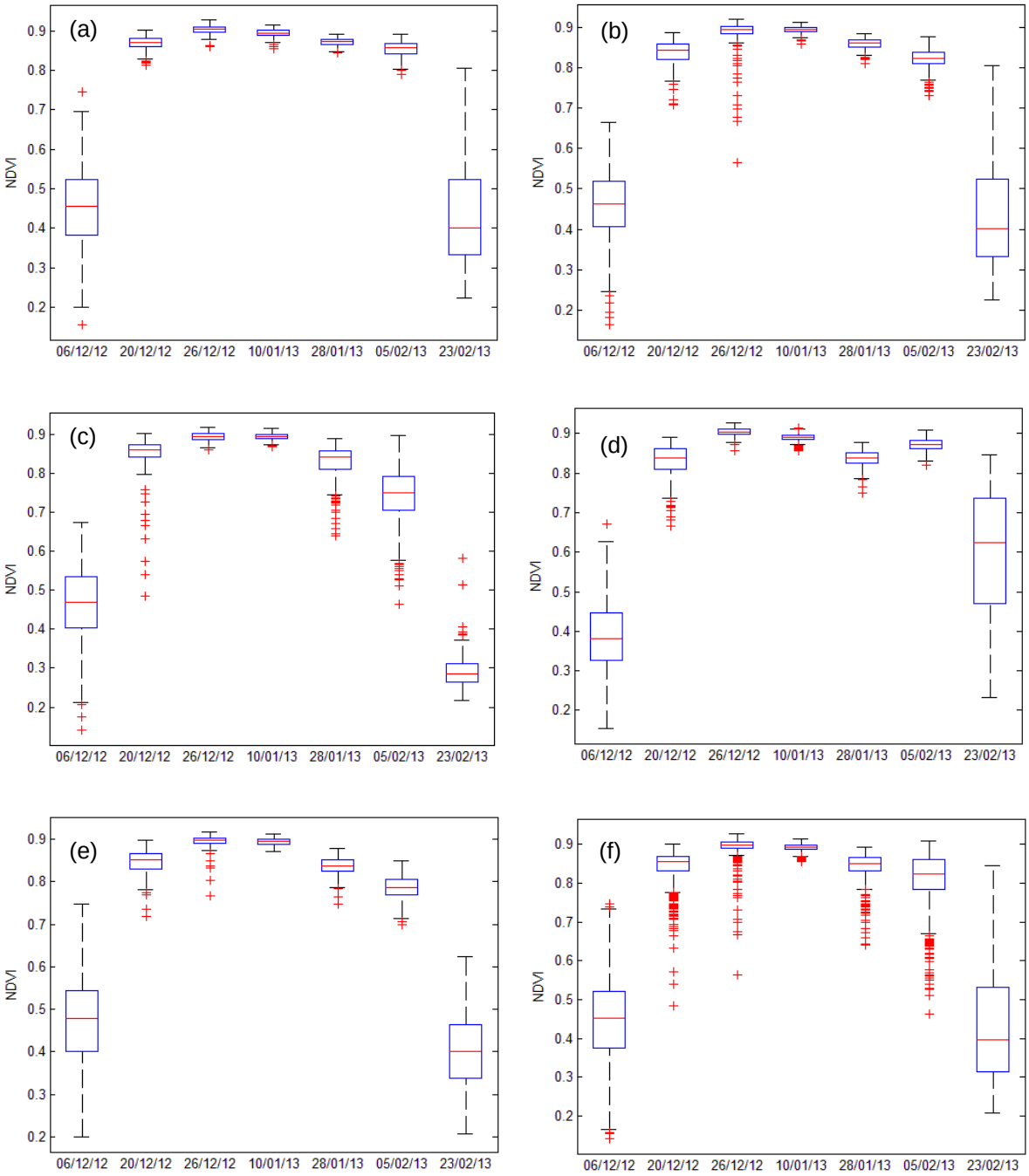


Figura 17 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 12 (f) e das subamostras A (a), B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado.

O diferente comportamento entre subamostras de um mesmo *pixel* apontam para possível interferência dos fatores cultivar e data da semeadura. No *pixel* 6 (Figura 13a)**,** por exemplo, a área foi semeada em duas etapas, com intervalo de 12 dias, e continha pelo menos seis cultivares. Os gráficos das subamostras (Figura 18) apresentaram diferença principalmente em relação aos dados referentes às datas 06/12/12 e 23/02/13. As subamostras A e C do *pixel* 6 (Figuras 18a e 18c) são semelhantes, pois pertencem à mesma

cultivar. Entretanto, diferem de B e D (Figura 18c e 18e), que pertencem a outras cultivares, que também diferem entre si.

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam o efeito dos fatores cultivar e data de amostragem sobre os índices NDVI para cada grupo de semeadura. A comparação entre cultivares mostrou existir diferença significativa a 5% de significância. Esse diagnóstico permite inferir a respeito da influência do fator cultivar sobre a resposta espectral da cultura.

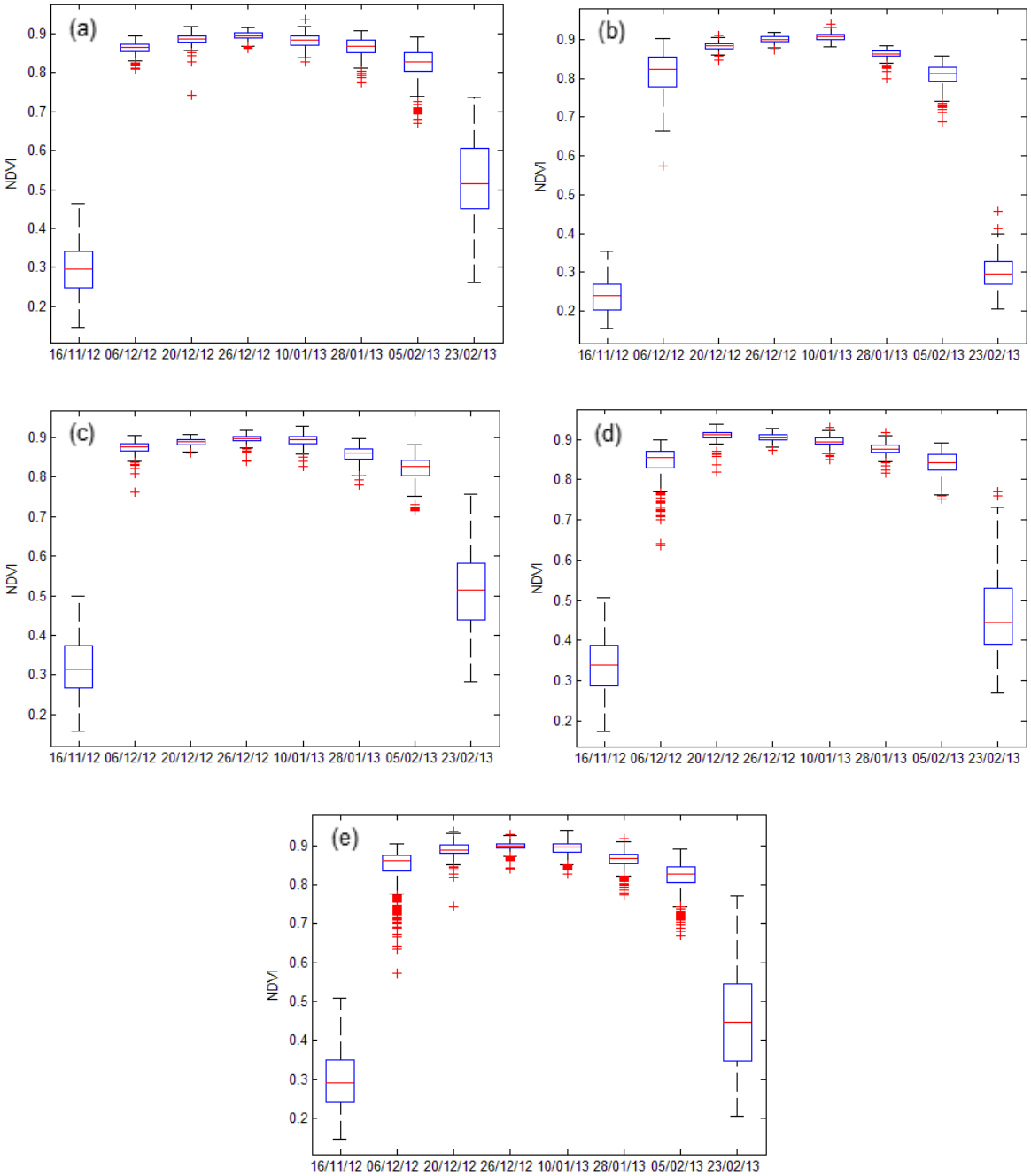


Figura 18 Boxplot dos dados de NDVI para o período avaliado, obtidos para cada subamostra A(a), B(b), C(c), D(d), e do conjunto de dados formado a partir do agrupamento das subamostras (e), referente ao *pixel* 6.

Tabela 7 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das cultivares de soja do grupo de semeadura 1 em diferentes datas de amostragem ao longo do ciclo

Cultivar	**16/11/12***		**06/12/12**		**26/12/12**		**10/01/13**		**28/01/13**		**05/02/13**	
	----------						NDVI		----------			
C1	0,657	aD	0,870	abC	0,927	aA	0,905	aB	0,540	bE	0,317	bF
C2	0,378	bE	0,859	bC	0,929	aA	0,913	aB	0,438	cD	0,273	cF
C3	0,347	cE	0,857	bC	0,925	aA	0,908	aB	0,444	cD	0,273	cF
C5	0,296	dE	0,881	aB	0,919	aA	0,905	aA	0,856	aC	0,652	aD

	p-valor
Cultivar	0,0000
Data de amostragem	0,0000
Cultivar x Data de amostragem	0,0000
CV (%): 9,74	N° de observações: 7920

Nota: * médias na mesma coluna seguidas de letras minúsculas iguais não diferem a 5% de significância pelo teste Tukey; médias na mesma linha seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem a 5% de significância pelo teste Tukey. CV = Coeficiente de Variação da Análise de Variância. (n = 330).

Tabela 8 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das cultivares de soja do grupo de semeadura 2 em diferentes datas de amostragem ao longo do ciclo

Cultivar	**16/11/12***		**20/12/12**		**26/12/12**		**10/01/13**		**28/01/13**		**05/02/13**	
	----------						NDVI		----------			
C4	0,245	cF	0,868	cC	0,925	aA	0,912	aB	0,666	dD	0,334	dE
C6	0,238	cE	0,884	bB	0,900	abA	0,899	bA	0,865	bC	0,794	bD
C7	0,324	aE	0,902	aAB	0,908	bA	0,898	bB	0,881	aC	0,840	aD
C9	0,311	bE	0,884	bB	0,898	cA	0,902	bA	0,813	cC	0,488	cD

	p-valor
Cultivar	0,0000
Data de amostragem	0,0000
Cultivar x Data de amostragem	0,0000
CV (%): 5,88	N° de observações: 7920

Nota: * médias na mesma coluna seguidas de letras minúsculas iguais não diferem a 5% de significância pelo teste Tukey; médias na mesma linha seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem a 5% de significância pelo teste Tukey. CV = Coeficiente de Variação da Análise de Variância. (n = 330).

Tabela 9 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das cultivares de soja do grupo de semeadura 3 em diferentes datas de amostragem ao longo do ciclo

Cultivar	**16/11/12***		**06/12/12**		**20/12/12**		**26/12/12**		**10/01/13**		**28/01/13**		**05/02/13**		**23/02/13**	
	----------								NDVI		----------					
C10	0,312	aF	0,868	aC	0,884	aB	0,895	aA	0,887	cAB	0,864	aC	0,824	aD	0,528	aE
C11	0,220	cG	0,812	cD	0,880	aB	0,886	bB	0,911	bA	0,849	bC	0,740	cE	0,279	cF
C12	0,245	bH	0,828	bE	0,886	aC	0,899	aB	0,921	aA	0,861	aD	0,771	bF	0,294	bG

	p-valor
Cultivar	0,0000
Data de amostragem	0,0000
Cultivar x Data de amostragem	0,0000
CV (%): 6,01	N° de observações: 7920

Nota: * médias na mesma coluna seguidas de letras minúsculas iguais não diferem a 5% de significância pelo teste Tukey; médias na mesma linha seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem a 5% de significância pelo teste Tukey; CV = Coeficiente de Variação da Análise de Variância. (n = 330).

5.2 Dados NDVI obtidos com sensor orbital

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam os perfis temporais dos 13 *pixels* monitorados nos talhões T1 e T2. A Figura 19 apresenta os perfis temporais referente aos *pixels 3, 5* e *8*, considerados como puros, devido à área estar dentro dos limites do talhão. Os perfis apresentam comportamento característico esperado para a cultura, em que os valores de NDVI iniciam-se baixos, aumentado à medida que a planta ganha biomassa, até atingir o pico vegetativo, quando o os valores de NDVI decrescem**,** devido à maturação e à perda de vigor.

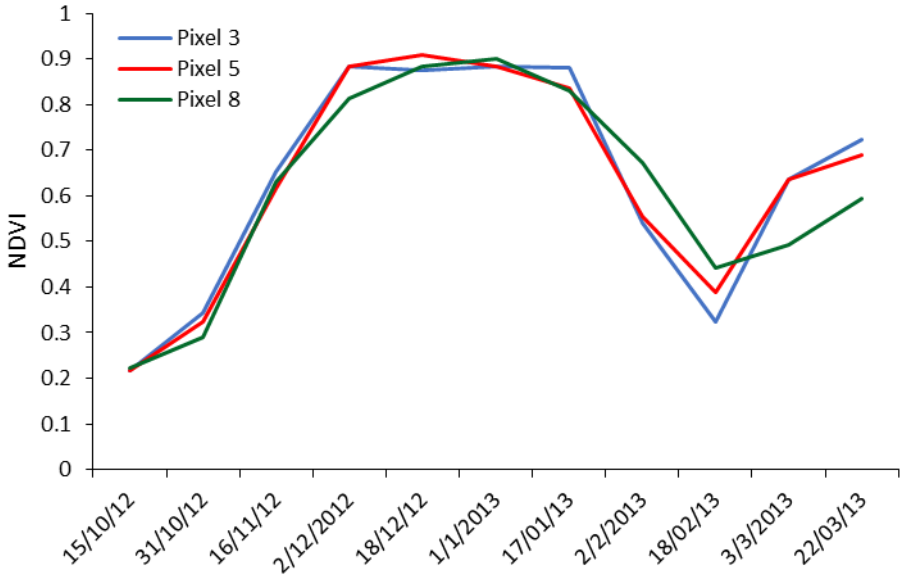


Figura 19 Perfis temporais de NDVI dos *pixels* do talhão T1 considerados como puros.

Os três perfis apresentam comportamento semelhante; entretanto**,** nota-se que o perfil referente ao *pixel* 8 apresenta uma curvatura mais suavizada (Figura 19). De acordo com os perfis, no período entre 15/10/12 e 16/11/12 as culturas apresentaram desenvolvimento muito semelhante. Entretanto**,** a partir de 16/11/12 o resultado apresentado pelos *pixels* é distinto, principalmente do perfil referente ao *pixel* 8 em relação aos perfis dos *pixels* 3 e 5. O perfil temporal referente ao *pixel* 5 atingiu o pico vegetativo em meados de dezembro (18/12/12), com NDVI médio de 0,91**,** aproximadamente, enquanto o perfil temporal referente ao *pixel 8* apresentou pico vegetativo com NDVI médio de 0,89 em 01/01/2013, aproximadamente 13 dias mais tarde. Esse comportamento pode ser explicado pela diferença nas datas de semeadura, uma vez que ambos apresentam aproximadamente 13 dias de diferença entre as datas de semeadura.

O perfil temporal de NDVI referente ao *pixel* 3 apresentou um comportamento atípico, afetado por uma queda incoerente do valor de NDVI obtido em 18/12/12. De acordo com

Esquerdo (2007), a queda do índice pode ser originária da interferência de nuvens. Segundo o relatório apresentado pela COODETEC, uma aplicação de fungicida foi realizada nesta data. A aplicação do fungicida sugere que a área poderia estar sob ataque de fungos, o que explica a queda no valor do índice, uma vez que o vigor da planta possa ter sido comprometido pela ação do patógeno. Pode-se observar também que**,** após a data descrita para aplicação do fungicida, o NDVI torna a subir até próximo do pico vegetativo, no período entre 17/01/13 e 02/02/13. A recuperação do vigor da planta por ação do fungicida pode ter sido responsável por esse aumento. Segundo Rodrigues (2009), parcelas de soja pulverizadas com fungicida apresentaram maior produção de massa e maior índice de área foliar.

A Figura 20 apresenta o perfil temporal dos *pixels* restantes, cuja área estava parcialmente localizada sobre o talhão monitorado. Alguns perfis**,** apesar de serem originários de *pixels* não puros, apresentam um comportamento similar a um *pixel* puro, como é o caso dos *pixels 6, 7 e 10*, devido a área do *pixel* que excedia o limite do talhão também apresentar uma cultura anual, coincidentemente**,** soja.

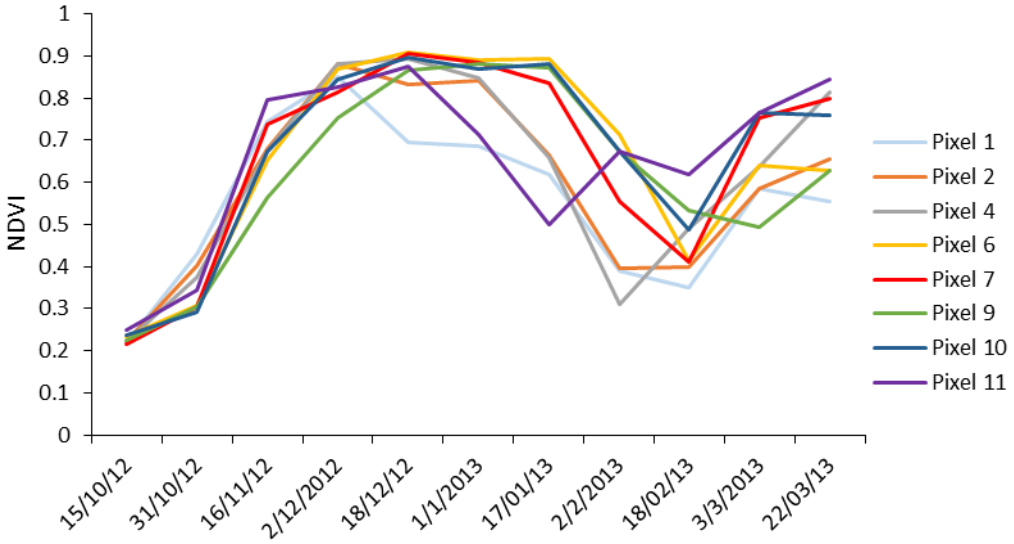


Figura 20 Perfis temporais de NDVI dos *pixels* do talhão T1, considerados como não puros.

Outros *pixels* cuja área que excedia o limite do talhão não possuíam cobertura vegetal, apresentaram comportamento aleatório, como no caso dos *pixels* 1 e 11, cuja curva do perfil temporal não descreve o comportamento de uma cultura anual.

Os pixels 12 e 13 apresentaram incoerência nos resultados maiores que o esperado, apesar do pixel não estar completamente dentro do talhão T2, boa parte de sua área, cerca de 90% de sua área estava sobreposta ao talhão. De acordo com o gráfico da Figura 21, os *pixel*s 12 e 13, apontam valores muito altos NDVI para fases iniciais de desenvolvimento da cultura, cerca de 0,45 e 0,33**,** respectivamente.

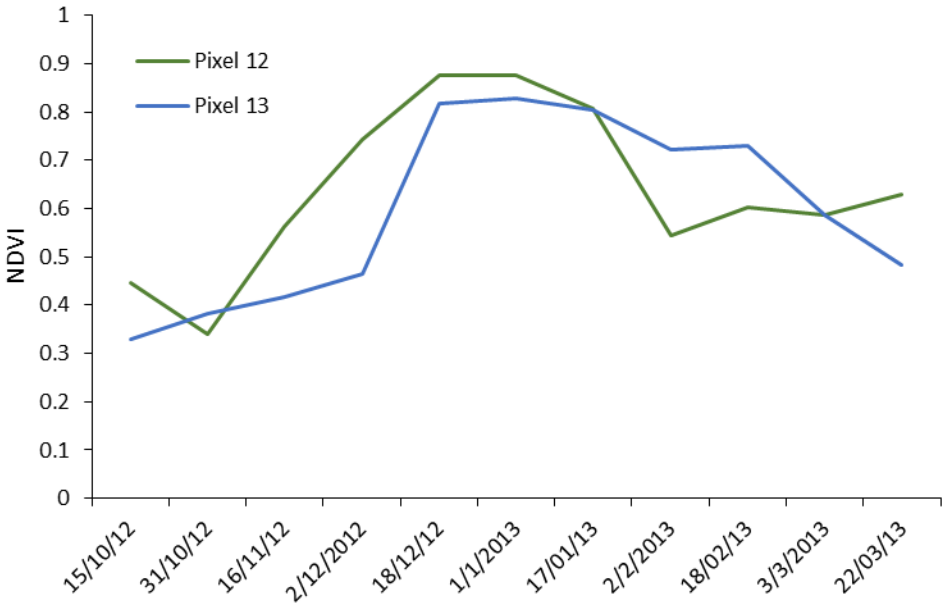


Figura 21 Perfis temporais de NDVI dos *pixels* do talhão T2 considerados como não puros.

O talhão T2 é circundado por vegetação da preservação permanente. Segundo Sakamoto *et al. (*2010), a área real amostrada para cada *pixel* do MODIS pode variar dependendo do ângulo de visada do sensor, na data em que se observa a localização na imagem composta. Por isso, é inevitável que os tipos de cobertura de solo, presentes nos arredores da área, afetem a resposta espectral do *pixel* alvo, sendo mais afetadas observações que ocorrem fora do nadir. Em tais *pixels*, o valor de NDVI é menor quando comparado à medição ao nadir, devido ao ângulo de visada elevado (próximos ao valor de corte 42°) e os efeitos da curvatura da Terra (ESQUERDO, 2007).

5.3 Verificação das condições agrometeorológicas de precipitação e comparação dos dados de NDVI obtidos com sensores orbital e não-orbital

A fim de verificar se algum resultado teve influência de eventuais déficits hídricos, foi conduzida uma análise da precipitação no decorrer do período estudado. Os períodos críticos de necessidade hídrica, determinado pelas fases de floração e enchimento de grãos, ocorreram num período aproximado de 64 dias entre 06/12/12 e 10/01/13. Segundo dados de precipitação obtidos pelo SIMEPAR, exibidos nos gráficos das Figuras 22, 23 e 24, a chuva acumulada neste período foi de 567 mm, perfazendo uma média de 8,85 mm dia^{-1}. Segundo Berlato *et al.* (1986)**,** esse volume de precipitação atende a demanda do período supracitado, não influenciando**,** portanto**,** no desenvolvimento normal da cultura.

A Tabela 10 apresenta as datas de aquisição dos dados, utilizadas na comparação dos sensores. Na primeira coluna estão relacionadas as datas das imagens composição de

16 dias. Vale ressaltar que a data da imagem refere-se ao primeiro dia da composição.Também são apresentados na Tabela 10 as datas na qual o *pixel* que compõe a imagem foi adquirido. Pode-se observar que a data de aquisição dos *pixels* foi praticamente a mesma, exceto do *pixel* 8. Na composição do dia 17/01/13**,** a data de aquisição do *pixel* 8 foi 31/01/13, enquanto que os *pixels 3* e *5* foram adquiridos em 17/01/13. No restante das composições**,** os *pixels* apresentaram mesma data de aquisição.

Apenas uma das datas de coleta entre os sensores coincidiram, o restante das datas comparadas apresentaram defasagem entre si. A composição do dia 18/02/2013**,** cuja data de obtenção dos pixels foi 23/12/2012, foi comparada a duas coletas do sensor não-orbital, uma delas obtidas três dias antes (20/12/2013) e outros três dias após (26/12/2012) o sensor orbital (Tabela 10).

Tabela 10 Relação das datas das imagens (composição de 16 dias), de aquisição dos *pixels*, e as respectivas datas de aquisição dos dados do sensor não-orbital, utilizada na comparação de média

	Sensor Orbital			**Sensor Não-orbital**
Composição	**Pixel 3**	**Pixel 5**	**Pixel 8**	
16/11/2012	28/11/2012	28/11/2012	28/11/2012	16/11/2012
02/12/2012	03/12/2012	03/12/2012	03/12/2012	06/12/2012
18/12/2012	23/12/2012	23/12/2012	23/12/2012	20/12/2012
18/12/2013	23/12/2012	23/12/2012	23/12/2012	26/12/2012
01/01/2013	10/01/2013	10/01/2013	10/01/2013*	10/01/2013*
17/01/2013	17/01/2013	17/01/2013	31/01/2013	28/01/2013
02/02/2013	04/02/2013	04/02/2013	04/02/2013	05/02/2013
18/02/2013	23/02/2013	23/02/2013	23/02/2013	23/02/2013

Nota: Composição: refere-se ao dia de início da composição da imagem de 16 dias. * médias iguais a 5% de significância pelo teste t.

De acordo com o teste de comparação de média realizado, em somente uma das datas comparadas os sensores foram estatisticamente iguais a 5% de significância. A data corresponde a 10/01/2013, porém a igualdade foi verificada apenas para o *pixel* 8.Verifica-se que esta foi a data quando a coleta de dados entre sensores coincidiu. O fato de as leituras terem sido obtidas no mesmo dia pode ter contribuído para o resultado. O restante dos *pixels (3 e 5)***,** apesar de a data de obtenção também coincidir com o sensor não-orbital, não obtiveram o mesmo resultado. Observando-se os gráficos referente aos *pixels 3 e* 5 (Figuras 22 e 23), é possível verificar que o comportamento da curva apresentou grande variação entre sensores, enquanto que as curvas referentes ao *pixel 8* (Figura 24) foram similares entre os sensores.

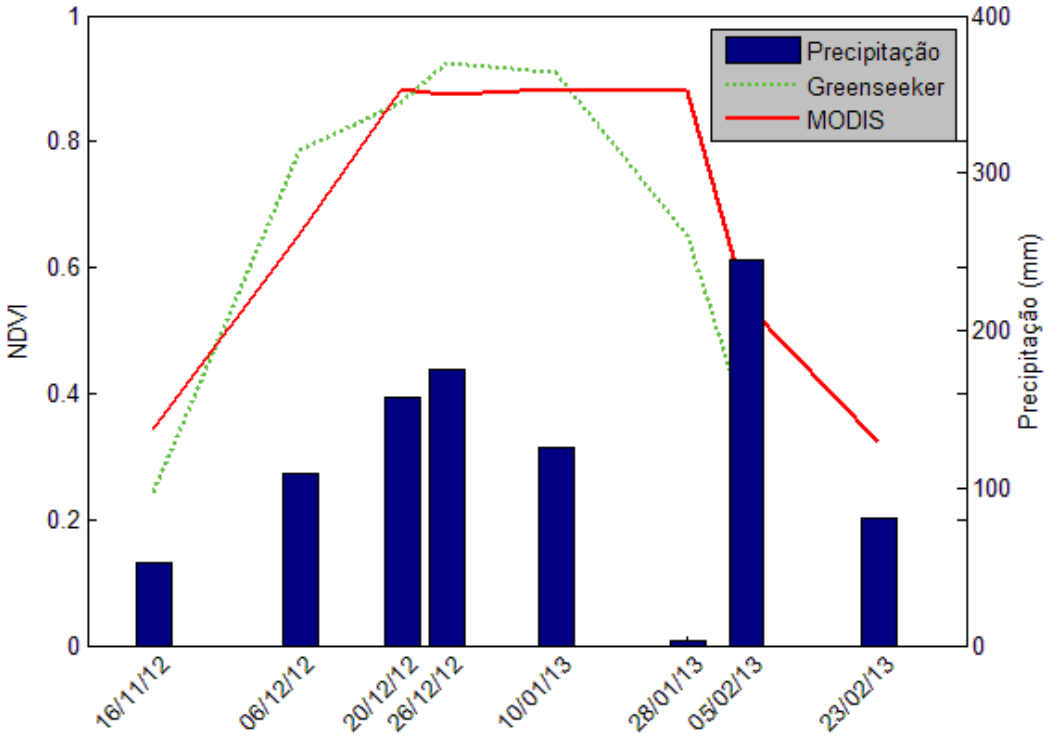


Figura 22 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 3 e a precipitação acumulada do período.

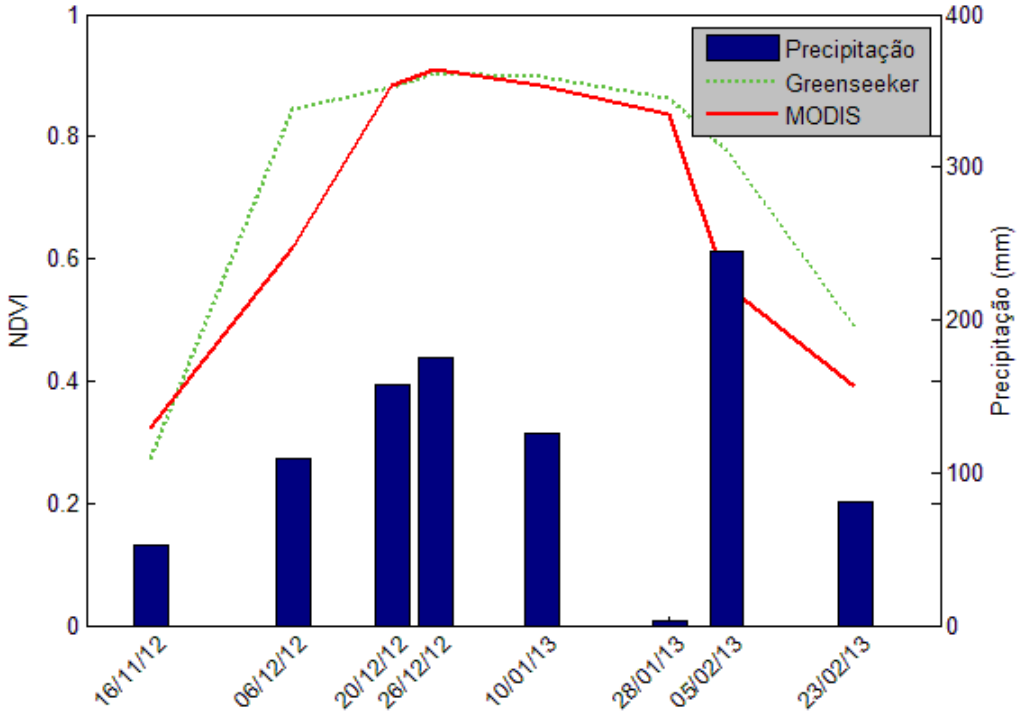


Figura 23 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 5 e a precipitação acumulada do período.

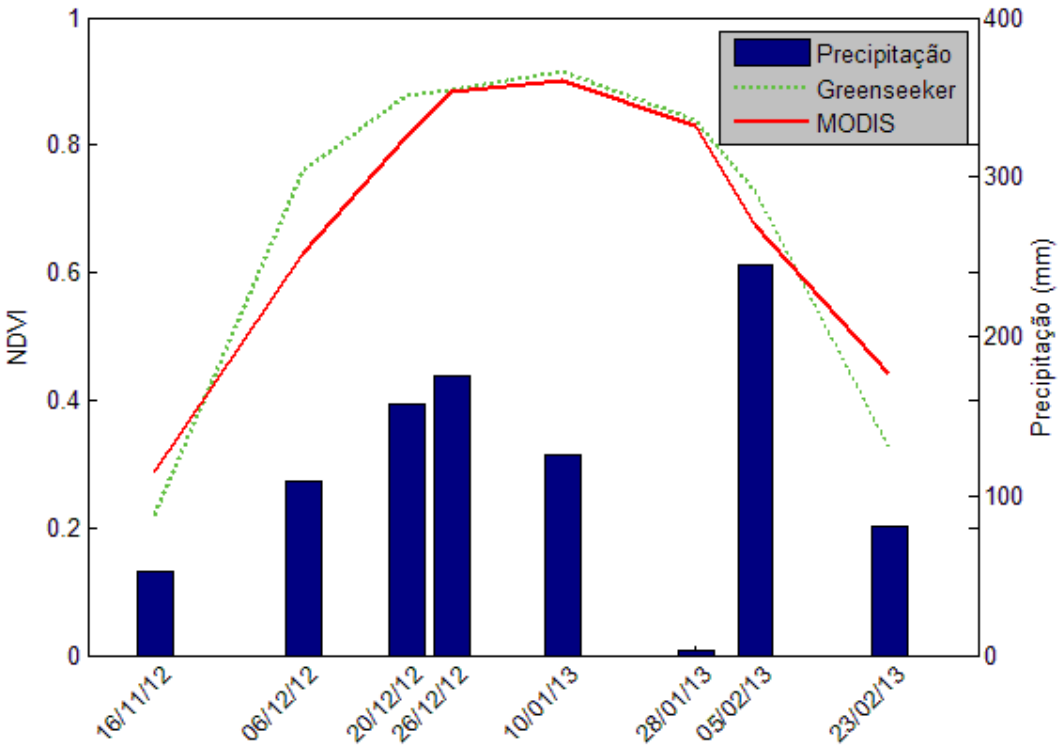


Figura 24 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 8 e a precipitação acumulada do período.

Contudo**,** a data a qual foi verificada a igualdade estatística (10/01/2013) corresponde ao pico vegetativo das cultivares contidas no *pixel 8*, como pode ser observado na Figura 24. O pico vegetativo corresponde a um período de alta biomassa, o que implica na saturação do índice NDVI. Huete (1988) e Erdle et al. (2011) relatam que o NDVI tende a saturar com o aumento da densidade do dossel, devido ao decréscimo da sensibilidade do sinal espectral. Dessa forma**,** é provável que a igualdade entre os sensores tenha ocorrido devido ao índice ter atingido o seu patamar máximo de valor.

As variações entre os dados dos sensores podem ser fruto das diferentes condições em que os dados são adquiridos para cada sensor. As composições de 16 dias do MODIS podem vir a apresentar ruídos, oriundos do ângulo de visada do sensor e também ruídos atmosféricos devido à presença residual de nuvens e a contaminação por aerossóis. Segundo Huete et al. (2002), a presença de ruídos certamente degrada o perfil temporal, impactando na avaliação precisa do início da fase vegetativa, do pico de vegetação e da senescência.

A largura de banda também pode ser um fator determinante na diferença dos dados entre sensores. Os sensores MODIS e o GreenSeeker® possuem grande diferença na largura de banda. O GreenSeeker® apresenta bandas de vermelho e infravermelho próximo mais estreitas (647.5 – 672.5; 767.5 – 792.5 nm) relativas às bandas do MODIS (620 – 670; 841 –

876 nm). Diferenças na largura de banda podem resultar em refletância diferentes e, portanto, NDVI diferentes.

6 CONCLUSÕES

Ambos os sensores demonstraram um bom alcance dinâmico e sensibilidade para monitorar e acessar variações espaciais e temporais da vegetação; contudo, o sensor não-orbital reproduziu com maior fidelidade o perfil temporal da cultura em relação ao orbital. O sensoriamento espectral ativo demonstrou ser mais flexível em termos de condições de iluminação, porém em relação a obtenção de dados, é um pouco limitado quanto a quantidade de bandas espectrais.

A comparação de dados obtidos entre diferentes cultivares, com o GreenSeeker®, demonstraram que as cultivares são estatisticamente diferentes a 5% de significância. Amostragens dentro de uma mesma cultivar também apresentaram diferenças, em virtude da variabilidade das características físicas e químicas do solo. No entanto, não foi possível determinar se as variações na resposta espectral são de origem fotossintéticas ou das variações na estrutura do dossel.

A comparação dos dados obtidos com o sensor orbital (MODIS) e o sensor não-orbital (GreenSeeker®) demonstrou que os dados são estatisticamente diferentes. Dentre os principais fatores apontados como causa, está a diferença na largura de banda entre os sensores, as quais podem resultar em refletâncias diferentes e, como consequência, valores de NDVI diferente. Outro fator é a presença de ruído na composição de 16 dias do MODIS, atribuídas ao ângulo de visada do sensor e efeitos da atmosfera como nuvens residuais e aerossóis.

Apesar de limitados, os resultados mostraram que existe correlação dos índices com o desenvolvimento da cultura. O uso de índices de vegetação para estimativa de parâmetros biofísicos é uma área que necessita ser explorada para que se possa compreender a sensibilidade dos índices na detecção de variações.

7 REFERÊNCIAS

ADAMI, M. **Estimativa da data de plantio da soja por meio de séries temporais de imagens MODIS**. 163p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, 2010.

ALLIPRANDINI, L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKLING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v.49, p.801-808, 2009.

APAN, A.; POTGIETER, A. **Using satellite imagery in determining winter crop area planted in support of regional commodity forecasting**: a case study if the Darling Down, Queensland. Australia: University of Southern Queensland/Faculty of Engineering and Survering, 2002.

BAGHZOUZ, M.; DEVITT, D. A.; FENSTERMAKER, L. F.; YOUNG, M. H. Monitoring vegetation phenological cycles in two different semi-arid environmental settings using a ground-based NDVI system: a potential approach to improve satellite data interpretation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 990-1013, 2010.

BARROS, G. S. C. **Economia da Comercialização Agrícola**. Brasil: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, 2006. 221 p.

BARROS, G. S. A. C.; FACHINELLO, A. L.; SILVA, A. F. (Coord.). **Desenvolvimento metodológico e cálculo do PIB das cadeias produtivas do algodão, cana-de-açúcar, soja, pecuária de corte e leite no Brasil.** Piracicaba: Centro de Estudos Avançados em Economia Agrícola, CEPEA/USP, 2011. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pibpec/PIB_Cadeias_relatorio2009_10.pdf> Acesso em: 15 dez. 2013.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BCB. **Relatório Anual 2008**. 2008. Disponível em: <http://www.bcb. gov.br/?BOLETIMANO>. Acesso em: 13 deabril 2013.

BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agrícola**, São Paulo, v.60, n.3, p.433-440, 2003.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BREGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.22, p.251-259, 1986.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e abastecimento – MAPA. **Soja**. 2013a. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/soja>. Acesso em: 15 dez. 2013.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. **Exportações brasileiras de commodities**. 2013b. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br> Acesso em: 12 abr. 2013.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria E Comércio Exterior – MDIC. **Balança comercial brasileira**. 2013c. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=5&menu=1161>. Acesso em: 13 abr. 2013.

CAMPBELL, P. K. E.; MIDDLETON, E. M.; MCMURTREY, J. E.; CORP, L. A.; CHAPPELLE, E. W. Assessment of vegetation stress using reflectance or fluorescence measurements. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 36, p. 832-845, 2007.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **PIB do agronegócio**. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>. Acesso em: 13 abr. 2013.

CHENG, Y.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; MAO, Z.; SIMS, D.A.; QIU, H.L.; CLAUDIO, H.; HUETE, A.; RAHMAN, A.F. A multi-scale analysis of dynamic optical signals in a Southern California chaparral ecosystem: A comparison of field, AVIRIS and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 369-378, 2006.

CLAY, D. E.; KIM, K. I.; CHANG, J.; CLAY, S. A.; DALSTED, K. Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, p.579-587, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Séries históricas de produtividade de grãos**. 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 13 abr. 2013.

COSTA, M. M.; DI MAURO, A. O.; UNÊDA-TREVISOLI, S. H.; ARRIEL, N. H. C.; BÁRBARO, I. M.; MUNIZ, F. R. S. Ganho genético por diferentes critérios de seleção em populações segregantes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1095-1102, 2004.

DOWN AGROSCIENCE. **CROP GROWTH CHART – SOYBEAN**. Disponível em: <http://www.fallowsolutions.com.au/CropGrowthCharts/tabid/463/Default.aspx>. Acesso em: 24 mar. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS. 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.**Tecnologias de Produção de Soja –** Região Central do Brasil, 2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja, Embrapa Cerrados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 262p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.**Tecnologias de produção de soja –** região central do Brasil 2012 e 2013. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Banco de produtos MODIS na base estadual brasileira**. 2014. Disponível em: <http://www.modis.cnptia.embrapa.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acesso em: 17 jan. 2014.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdan, v. 124, n. 1, p. 74–84, 2011. Elsevier B.V. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378429011002061>. Acesso em: 29 maio 2014.

ESQUERDO, J. C. D. M. **Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná**. 2007. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

ESQUERDO, J. C. D. M.; JÚNIOR, J. Z.; ANTUNES, J. F. G. Uso de perfis multi-tempoais de NDVI/AVHRR no acompanhamento da cultura da soja no oeste do Paraná In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Natal-RN, abril, p. 145-150, 2009.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. United States: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p.

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: 45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria, **Anais...** UFSCar, São Carlos, SP, 2000. p.255-258.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Características espectrais de culturas e rendimento agrícola**. São José dos Campos: INPE, 1990, 166 p.

FUNK, C.; BUDDE, M. E. Phenologically tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 113, p. 115–125, 2009.

FUSSEL, J.; RUNDQUIST, D.; HARRINGTON, J. A. On defining remote sensing.**Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,** Bethesda, v. 52, n. 9, p. 1507-1511, 1986.

GAMON, J. A.; RAHMAN, A. F.; DUNGAN, J. L.; SCHILDHAUER, M.; HUEMMRICH, K. F. Spectral Network (SpecNet)—What is it and why do we need it? **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 227-235, 2006.
26.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000, 477 p.

GUIMARÃES, M. F.; NOGUEIRA, J. M. A experiência norte-americana com o seguro agrícola: lições ao Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 47, n. 1, p. 27-58, 2009.

HILKER, T.; COOPS, N. C.; NESIC, Z.; WULDER, M. A.; BLACK, A. T. Instrumentation and approach for unattended year round tower based measurements of spectral reflectance. **Computer and Electronics in Agriculture**, New York, v. 56, p. 2-84, 2007.

HILL, M.J.; DONALD, G.E. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmental landscapes using AVHRR NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.84, p.367-384, 2003.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, 25, 295–309, 1988.

HUETE, A; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E..Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote sensing of Environment**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 195–213, 2002. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425702000962>. Acesso em: 6 maio 2014.

HUNT, G. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, v. 42, n. 3, p. 501–513, 1977.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de dados agregados:** Censo Agropecuário. 2013a. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp?z=t&o=11&i=P>. Acesso em: 13 abr. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2013b. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>. Acesso em: 10 abr. 2013.

JACKSON, R.D. Spectralindices in n-Space. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.13, p.409- 421, 1983.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation index. **Preventive Veterinary Medicine**, New York, v.11, n.3-4, p.185-200, 1991.

JACQUEMOUD, S.; BARET, F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v, 34, p. 75–91, 1990.

JENSEN, J. R. Remote sensing of vegetation. In: JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment, an earth resource perspective**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000, p. 333-377.

JIN, S.; SADER, S. A. MODIS time-series imagery for forest disturbance and quantification of patch effects. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.99, n. 4, p. 462−470, 2005.

JOHANN, J. A.; ARAÚJO, G. K. D.; ROCHA, J. V. Avaliação do perfil temporal de NDVI decendial do sensor SPOT Vegetation em *pixel*s “puros” e “não puros” derivados de mapa de uso da terra realizado a partir do sensor Landsat-5/TM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Natal-RN, abril, p. 223-229, 2009.

JOHANN, H. A.; OPAZO, M.A.U.; SOUZA, E.G.de. ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2/3, p.212-219, 2004.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT – a program for analysing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, Ottawa, v. 30, p. 833-845, 2004.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, Terre Haute, v. 6, n. 8, p. 1271−1318, 1985.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; KALB, V. L. Representation of vegetation by continental data sets derived from NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, Terre Haute, v. 12, n. 5, p. 999−1021, 1991.

KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. **Regionalização dos testes de valor de cultivo e uso e da indicação de cultivares de soja** – terceira aproximação. Londrina, PR: EMBRAPA-CNPSO, fev 2012. (Documentos 330). p. 9-69 p.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 1, 155–159, 1970.

LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O. Produtos para ecossistemasterrestres – MODLAND. In.: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. (Org). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos/SP: Parêntese, 2007, p.23-35.

LI, G.; WAN, S.; ZHOU, J.; YANG, Z.; QIN, P. Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinuscommunis* L.) seedlings to salt stress levels. **Industrial Crops and Products**, v. 31, p. 13–19, 2010.

LOVELAND, T. R.; MERCHANT, J.W.; OHLEN, D. O.; BROWN, J. F. Development of a landcover characteristics data base for the conterminous U.S. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 57, n. 11, p. 1453−1463, 1991.

HIRAKURI, M. H; LAZZAROTO, J. J. E**volução e perspectivas de desempenho econômico associadas com a produção de soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina, PR: EMBRAPA-CNPSO, out 2011. (Documentos 319). p. 11-67 p.

MARTHA JUNIOR, G. B.; ALVES, E.; CONTINI, E.; RAMOS, S. The development of Brazilian agriculture and future challenges. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, p.91-104, 2010.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P.; RAJ, S.; WANG, S.; YANG, Y. 2011. Crop yield forecasting on the Canadian prairies using MODIS NDVI data. **Agriculture Forest Meteorology,** v. 151, p. 385–393, 2011.

MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil**. 1 ed. Campinas: ITAL, 1981, 1062 p.

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Technical specifications, 2013. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php> Acesso em: 15 dez. 2013.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 839–847, 2006.

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 114 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2000.

MÜLLER, L. Morfologia, anatomia e desenvolvimento. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Eds). **A soja no Brasil**. 1 ed., p. 65-104, 1981.

MYNENI, R. B.; HALL, F. G.; SELLERS, P. J.; MARSHAK, A. L. The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Caceres, v. 33, n. 2, p. 481-486, 1995.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **Technical specifications:** Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). 2014. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>. Acesso em: 17 jan. 2014.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. NOAA Satellite Information System: national environmentall satellite, data, and information service. 2014. Disponível em: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>. Acesso em: 15 jan. 2014.

NTECH INDUSTRIES. **GreenSeekermanuals**. 2008. Disponível em: <http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html> Acesso em: 16 abr. 2013.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento – SEAB. **Banco de dados da produção agropecuária no Paraná**: situação mensal de plantio, colheita e comercialização de produtos agrícolas no Paraná. 2013. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/pss. xls>. Acesso em: 15 nov. 2013.

PENARIOL, A. 2000. **Soja**: Cultivares no lugar certo. Informações Agronômicas 90:13–14.

PINO, F. A. **Estimação subjetiva de safras agrícolas**. Informações Econômicas, v. 31, n. 6, p. 55-58, 2001.

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

POTGIETER, A. B. **Determining broadacre crop area estimates through the use of multi-temporal MODIS satellite imagery for major Australian winter crops**. 2009. 203p. Tese (DoutoradoemFilosofia) – University of Southern Queensland, Australia, 2009.

PROBUST, A. H.; JUDD. R. W. Origin, U.S. history and development, and world distribution. In: CALDWELL, B. E.; HOWELL, R. W.; JUDD, R. W.; JOHNSON, H. W. **Soybeans:** improvement, production, and uses. Madison: American Society of Agronomy. p. 1-15, 1973.

REED, B.; BROWN, J. F.; VANDERZEE, D.; LOVELAND, T. R.; MERCHANT, J. I. W. Measuring phonological variability from satellite. **Journal of Vegetation Science,** v. 5, p. 703-714, 1994.

RODRIGUES, M. A. T. **Avaliação do efeito fisiológico do uso de fungicidas na cultura de soja**. 2009. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-24022010-165137/>. Acesso em: 18 maio 2014.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In; FREDEN, S. C.: MERCANTI, E. P.; BECKER, M. A. (Comp.). **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**. Washington: Scientific and Technical Information Office, NASA. 1973. v. 1, p. 309- 317.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, Terre Haute, v. 12, p. 2477–248, 1991.

SANO, E. E.; ASSAD, E. D.; ORIOLI, A. L. Monitoramento da ocupação agrícola. In: ASSAD, E. D.; SANO, E.E. (coord) **Sistemas de Informações Geográficas, Aplicações na Agricultura**. 2 ed. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-CPAC, 1998. p. 179-190.

SANTOS, O. S. **A cultura da soja 1:** Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Globo. 1988. 299 p.

SAKAMOTO, T.; WARDLOW, B. D.; GITELSON, A. A.; et al. A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 114, n. 10, p. 2146–2159, 2010. Elsevier Inc. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442571000132X>. Acesso em: 26 mar. 2014.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; BARROS, H. B. Origem, evolução e importância econômica. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologia de produção e uso da soja.** Londrina: Mecenas, 2009. p. 314.

SEDIYAMA, T; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S. Melhoramento da soja. In: BORÉM, E. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005, p. 553-604.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C.; LUDLOW, M.M.; LEACH, G.J.; LAWN, R.J.; FOALE, M.A. Field and model analysis of the effect of water deficits and nitrogen accumulation by soybean, cowpea and black gram. **Field Crops Research**, Amsterdan, v. 17, p. 121-140, 1987.

SUGAWARA, L. M. **Avaliação de modelo agrometereológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no estado do Paraná**. 2001. 181 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2001.

SUMNER, A. D.; ALSTON M. J.; GLAUBER W. J. Evolution of the economics of agricultural policy. **American Journal of Agricultural Economics**, Cary, v. 92, n. 2, p. 403-423, 2010.

SWAIN, P. H.; **Remote sensing**: the quantitative approach. New York: Mcgraw-Hill, 396 p., 1978.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; PAUW, E. D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 71, p. 158–182, 2000.

THENKABAIL, P. S.; ENCLONA, E. A.; ASHTON, M. S.; Van DER MEER, B. (2004). Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 91, p. 354–376, 2004.

TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C. O. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. **International Journal of Remote Sensing**, Terre Haute, v. 8, n. 8, p. 1189−1207, 1986.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. Production, supply and distribution. 2013. Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>. Acesso em: 13 abr. 2013.

VERMOTE, E. F.; VERMEULEN, A. **AtmosphericCorrectionAlgorithm: SpectralReflectances (Mod09)**. Version 4.0. 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf >, Acesso em: 12 abr. 2013.

APÊNDICE

APÊNDICE A – GRÁFICOS BOXPLOT DO NDVI DOS *PIXELS* E RESPECTIVAS SUBAMOSTRAS.

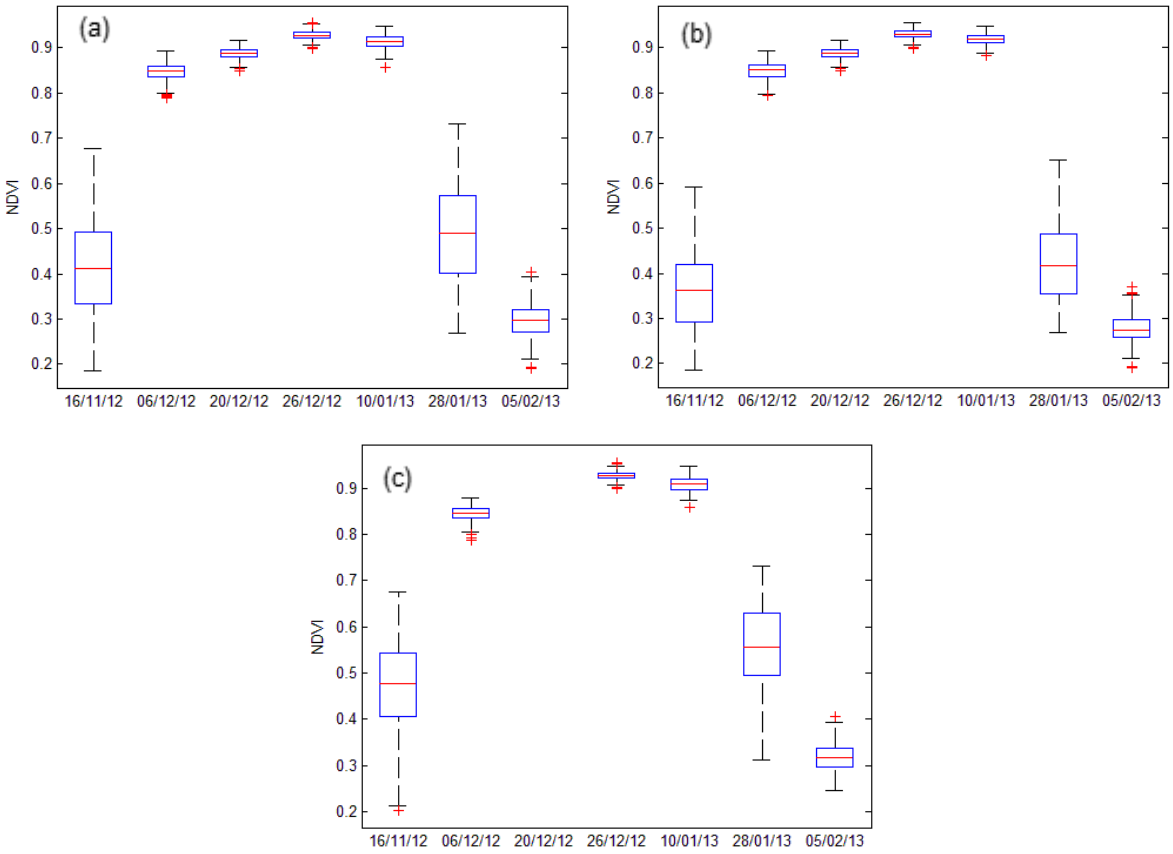


Figura 25 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 1 (a) e das subamostras B (b) e E (c) para o período avaliado.

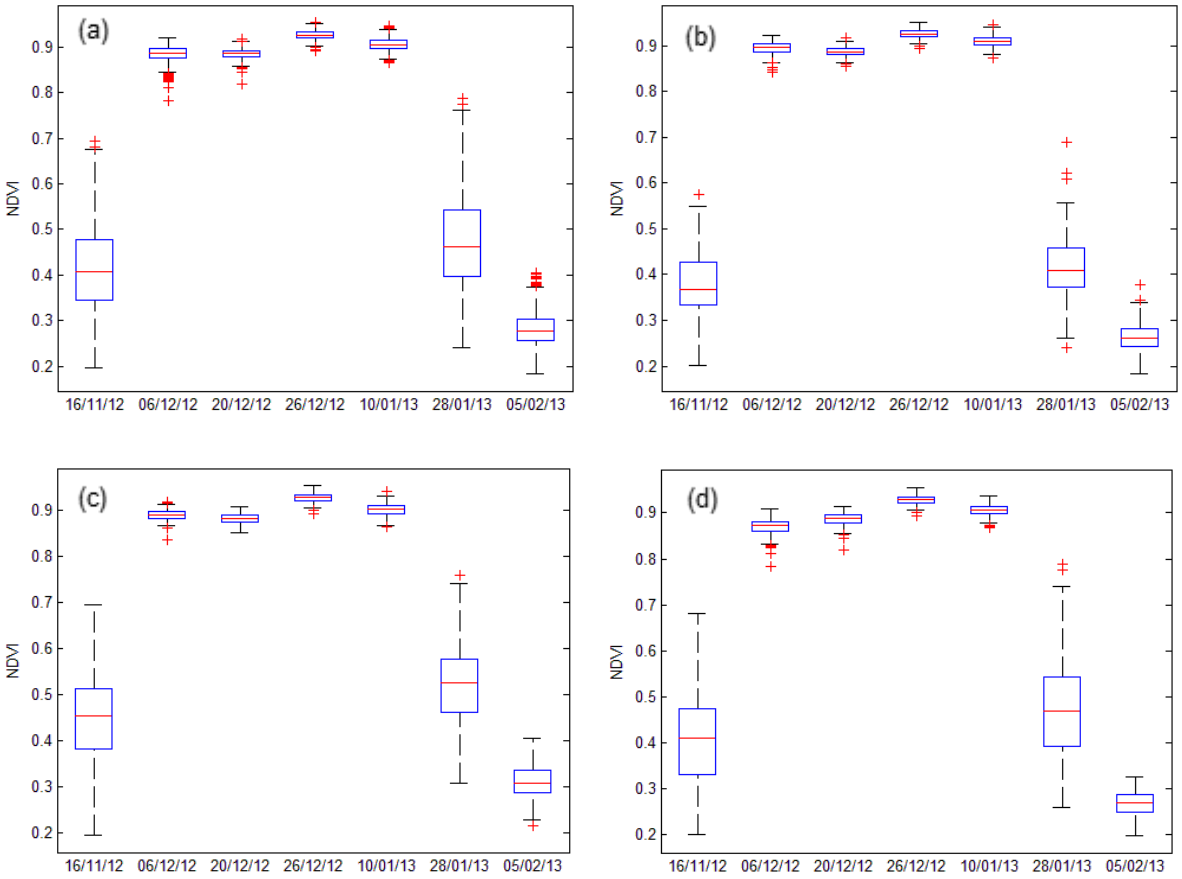


Figura 26 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 2 (a) e das subamostras B (b), C (c) e E (d) para o período avaliado.

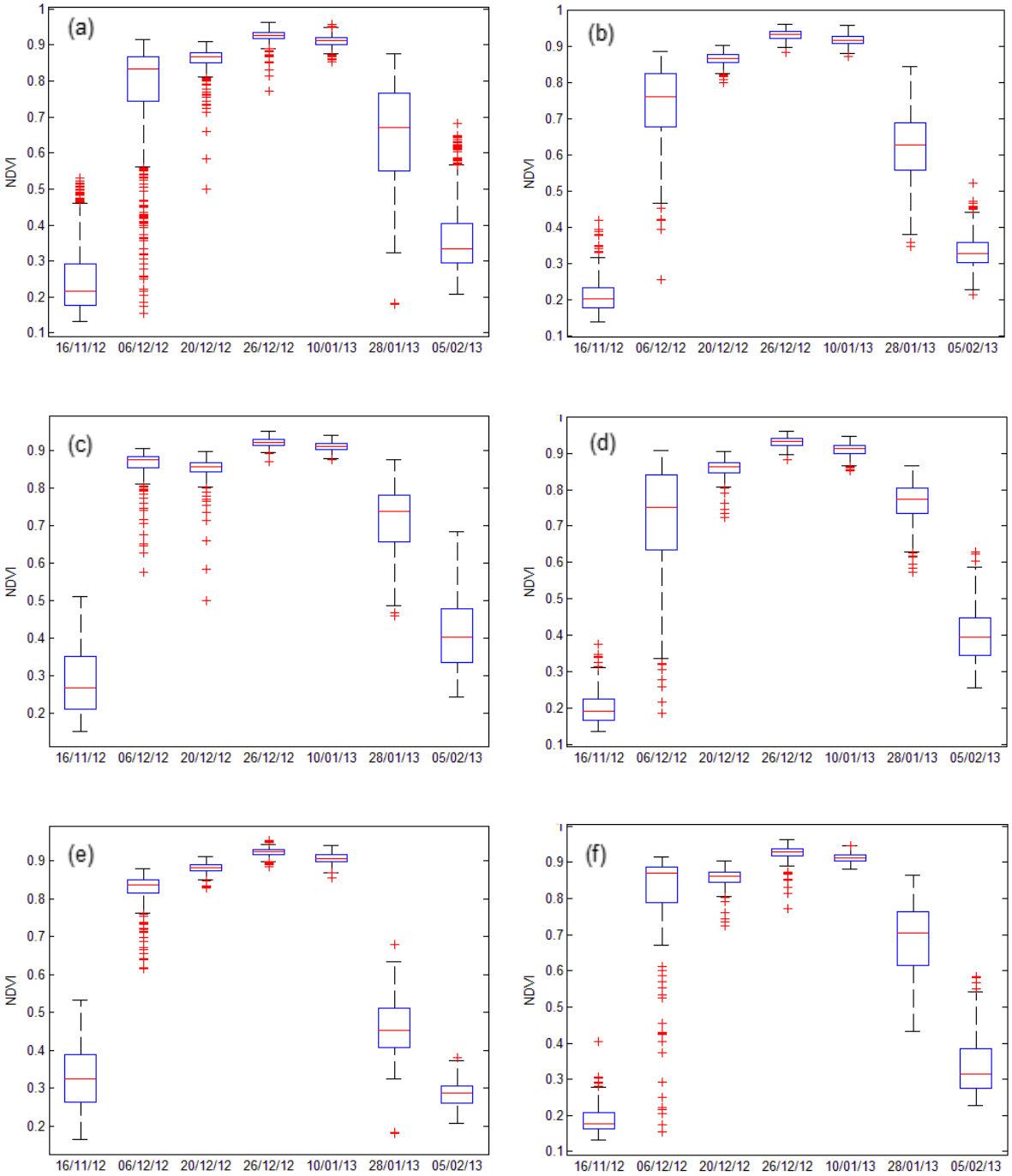


Figura 27 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 3 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado.

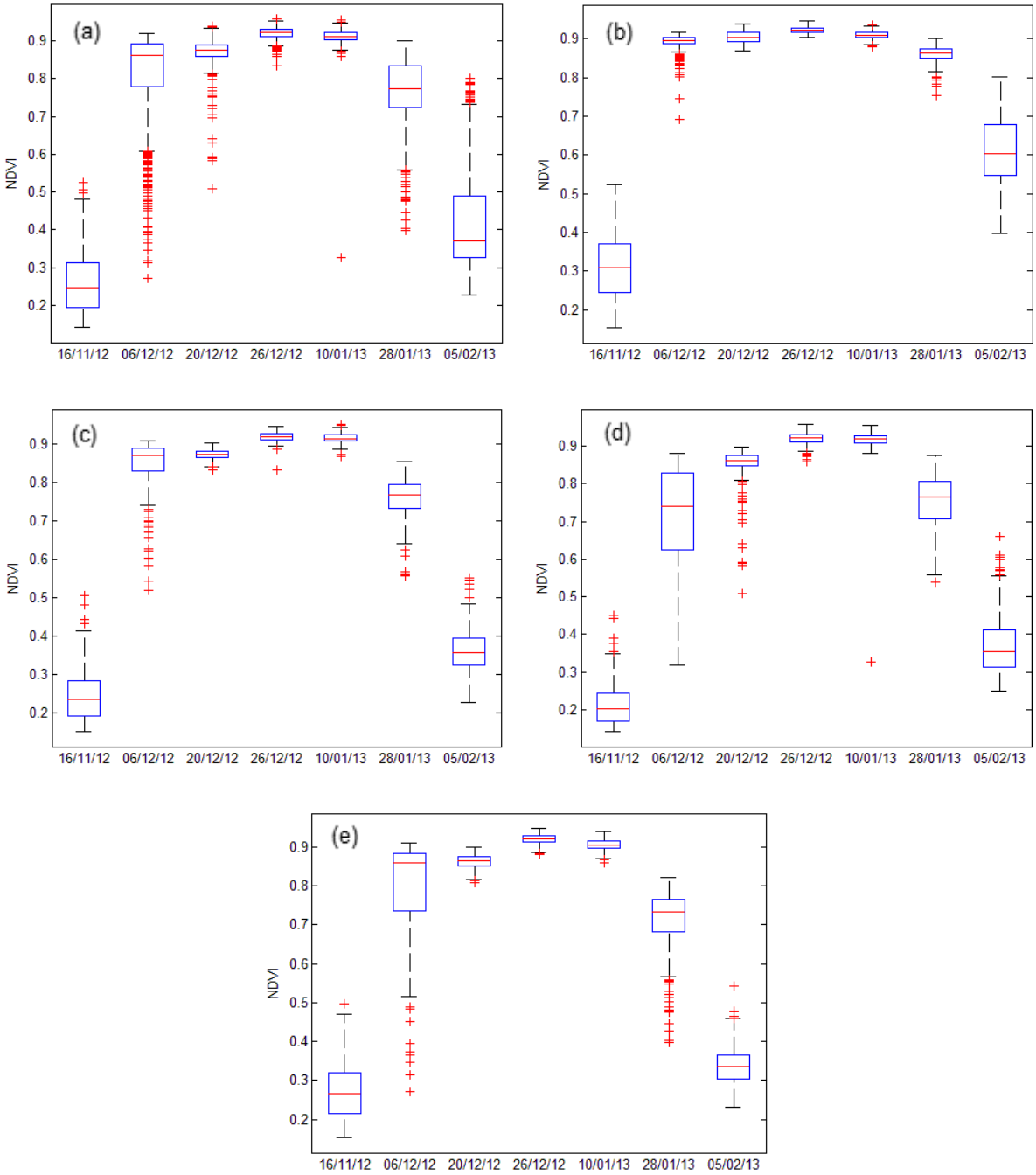


Figura 28 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 4 (a) e das subamostras B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado.

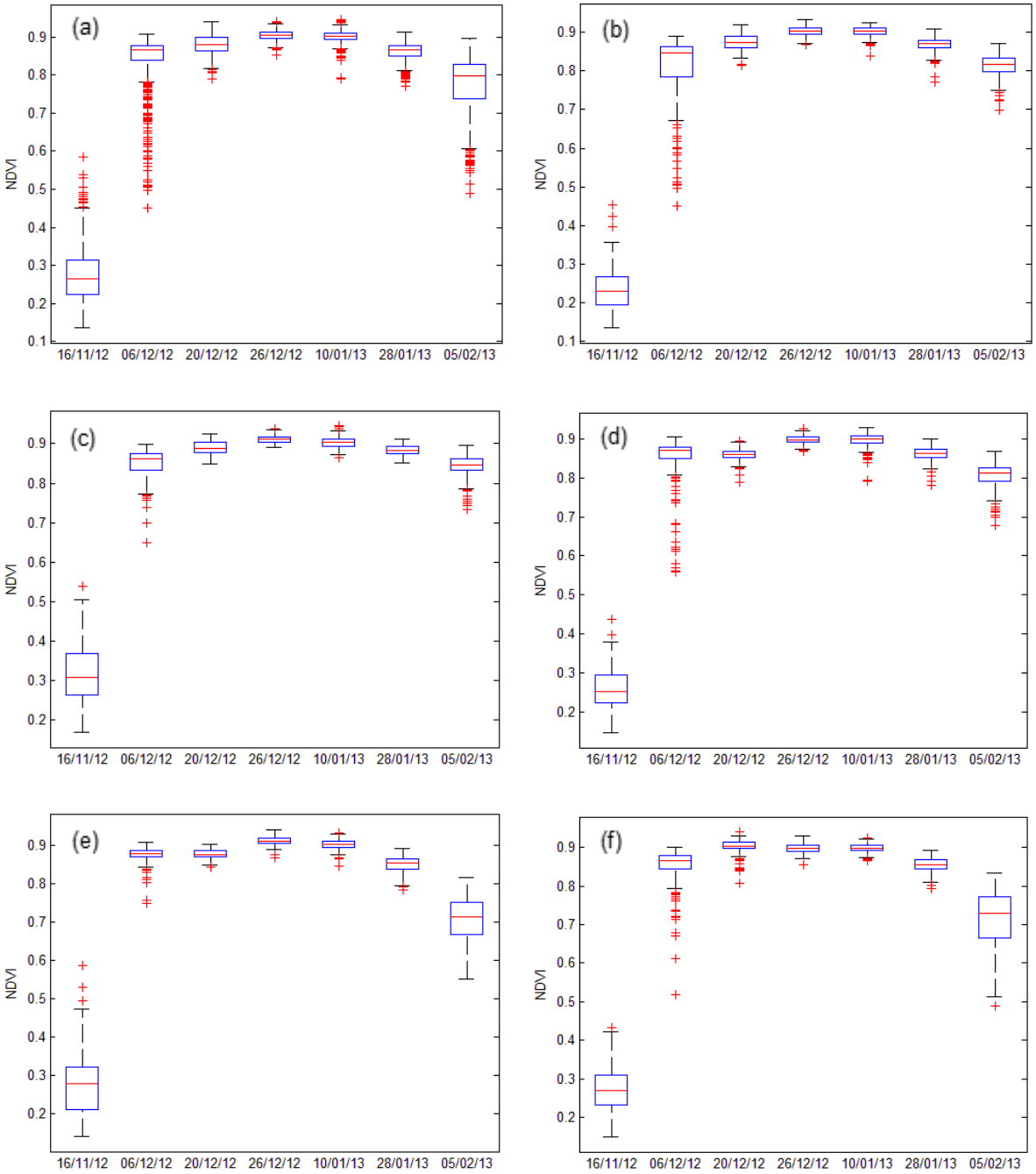


Figura 29 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 5 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado.

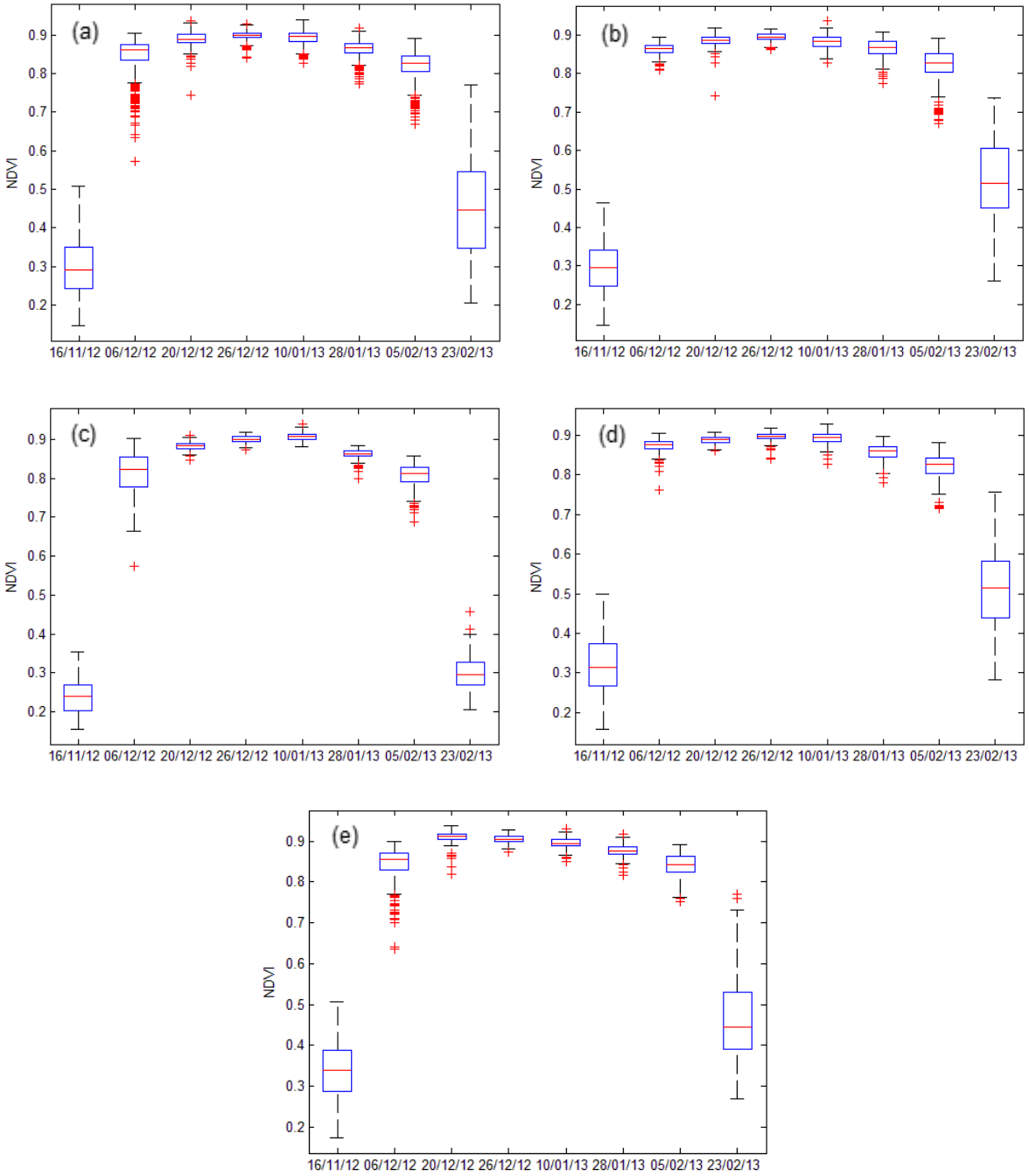


Figura 30 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 6 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d) e D (e) para o período avaliado.

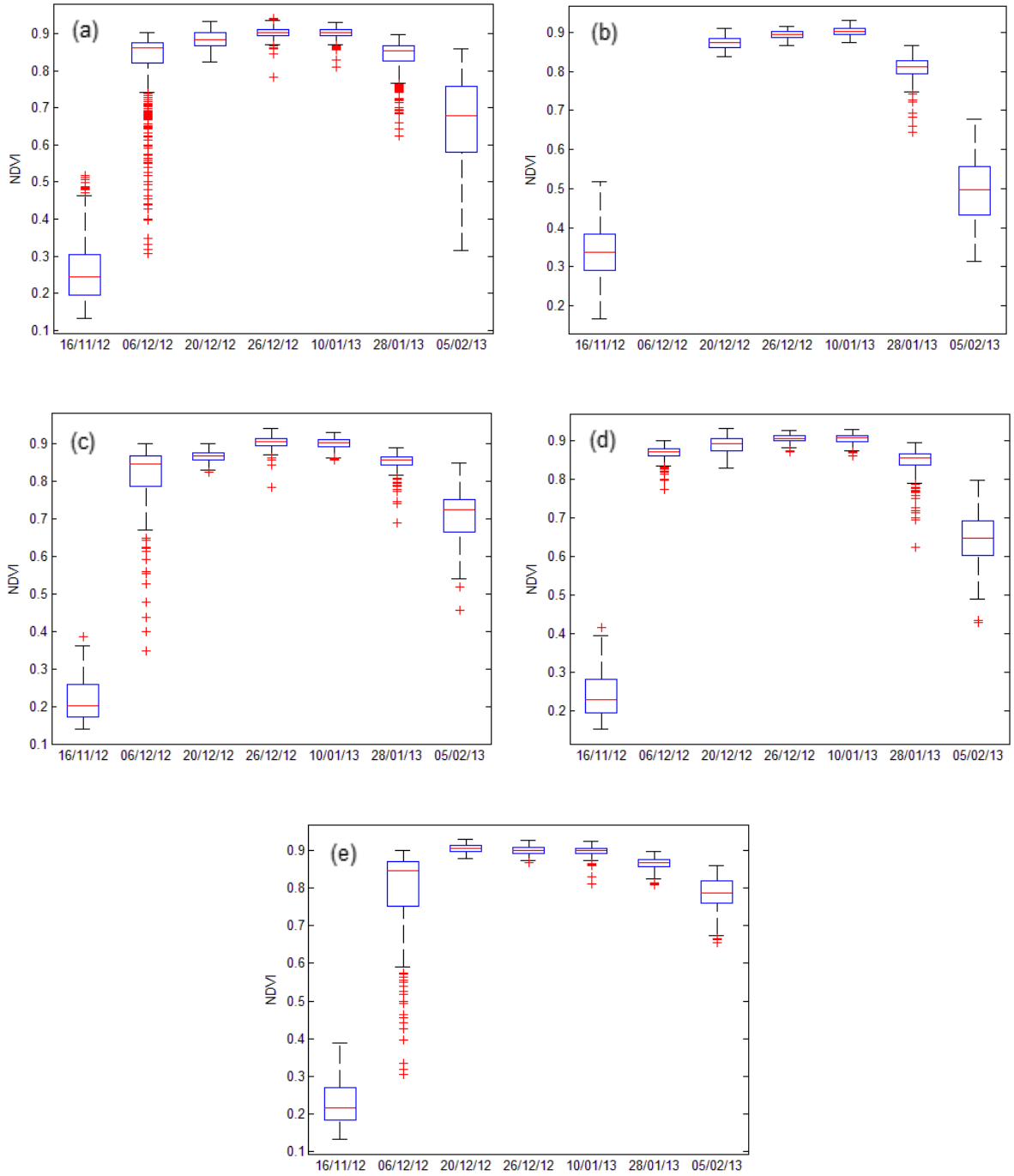


Figura 31 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 7 (a) e das subamostras B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado.

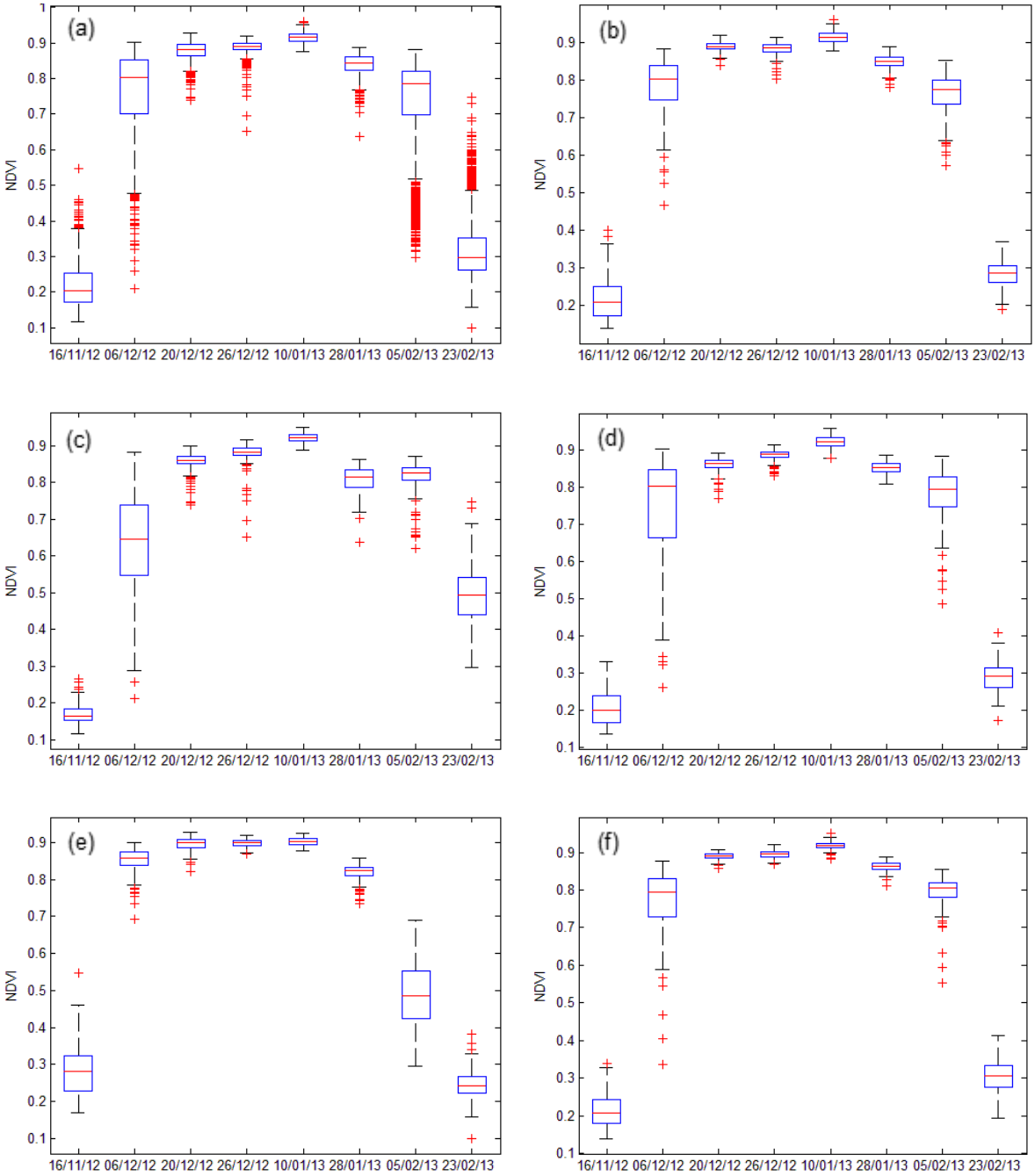


Figura 32 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 8 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado.

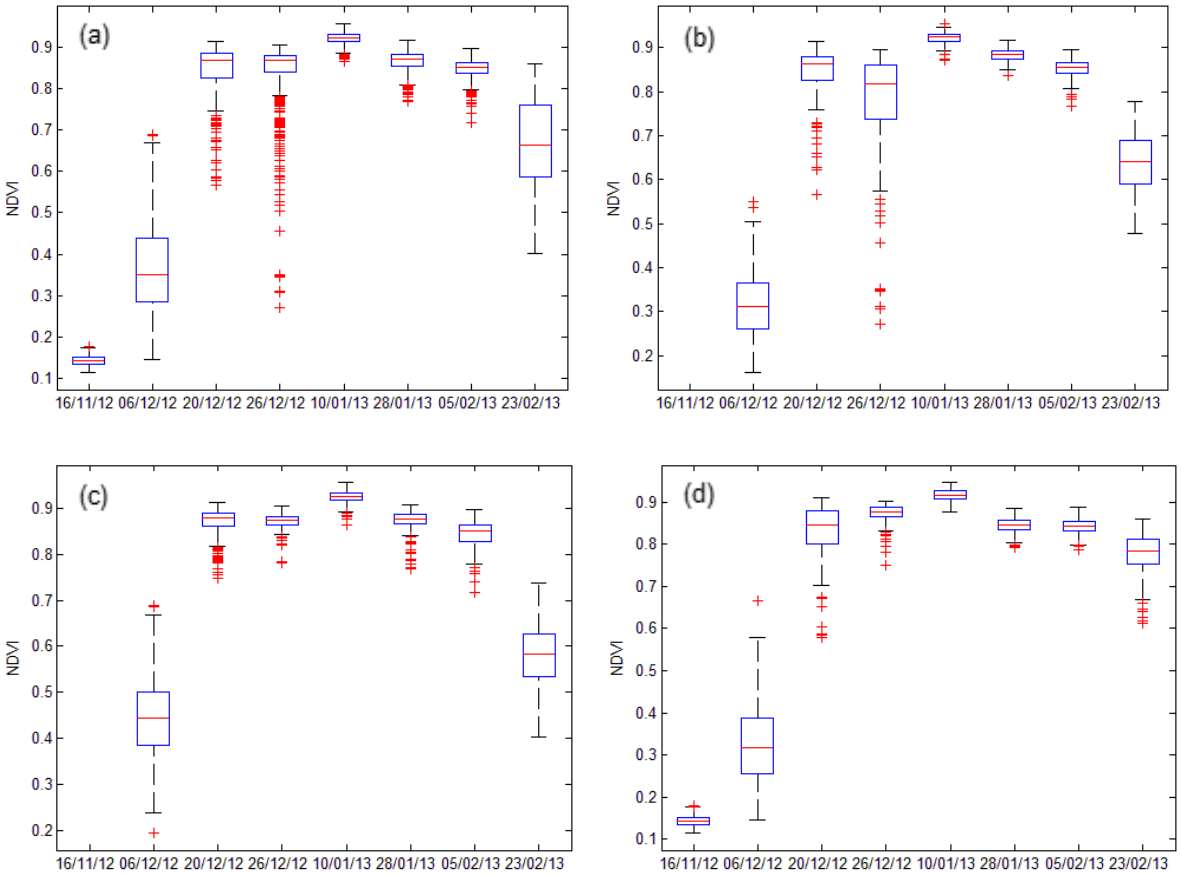


Figura 33 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 9 (a) e das subamostras A (b), C (c) e D (d) para o período avaliado.

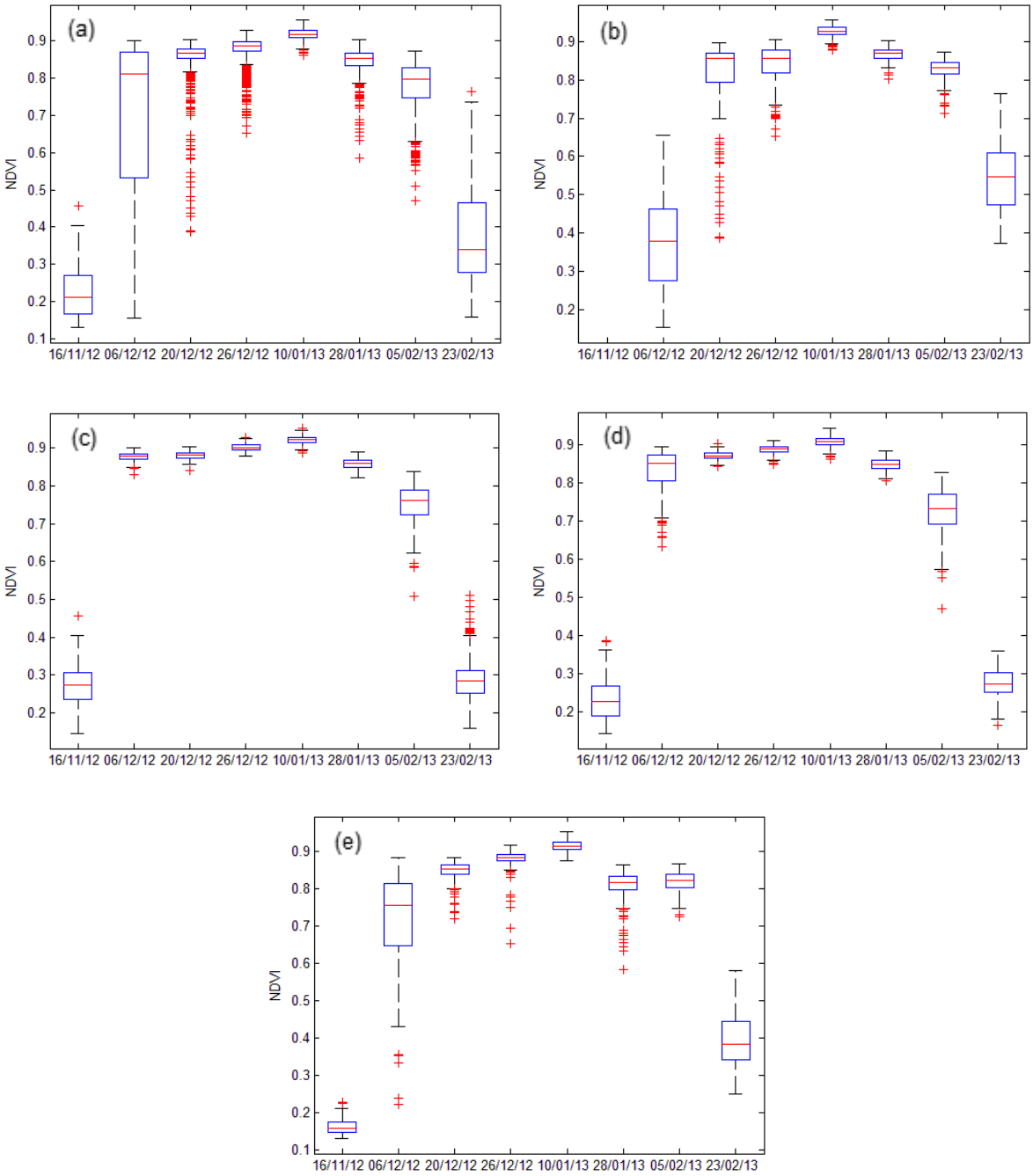


Figura 34 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 10 (a) e das subamostras B (b), C (c), D (d) e E (e) para o período avaliado.

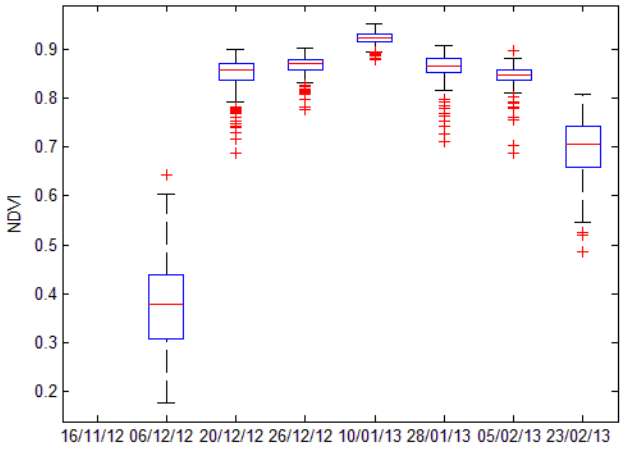


Figura 35 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 11 para o período avaliado.

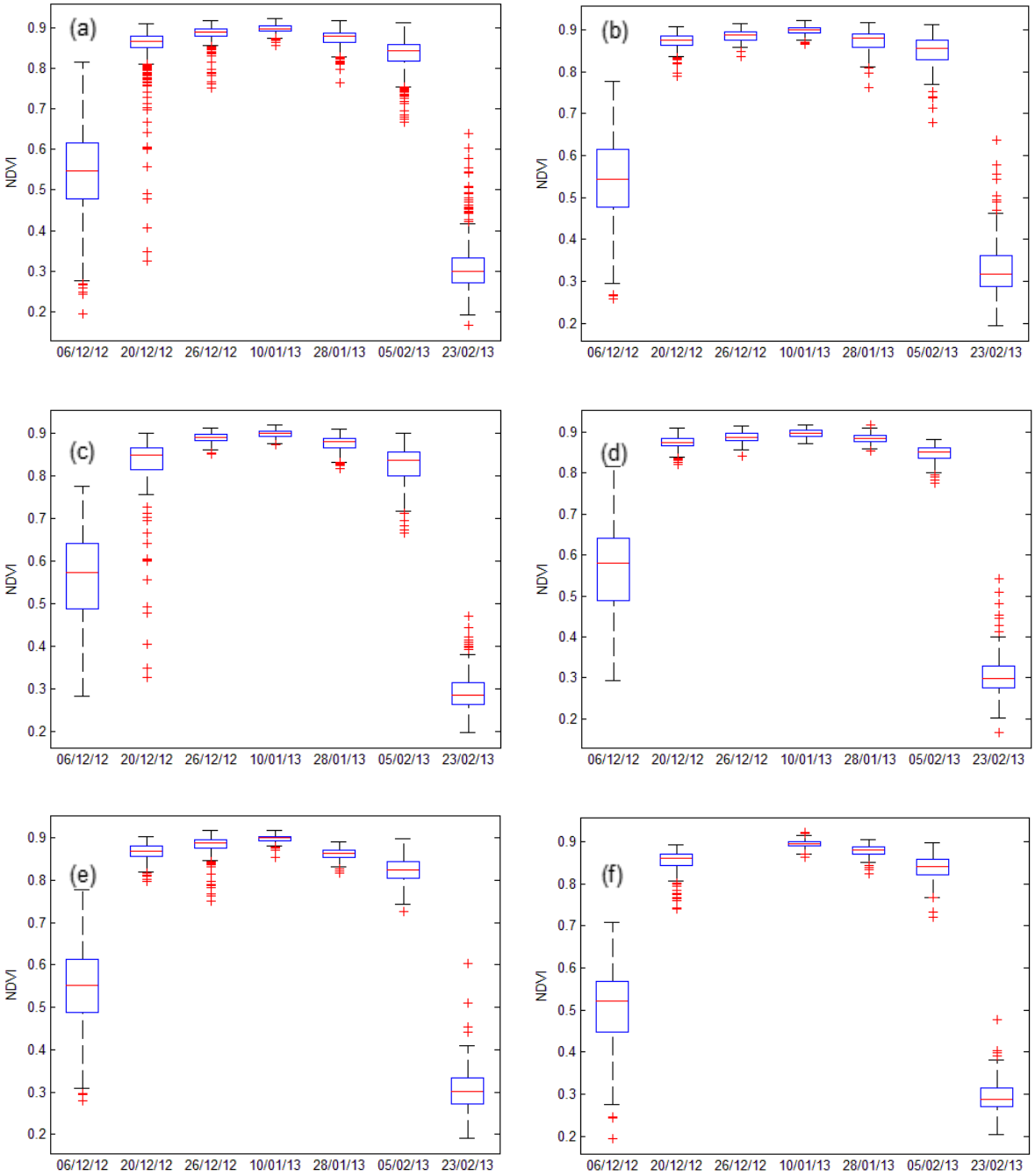


Figura 36 Boxplot dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI da amostra do *pixel* 13 (a) e das subamostras A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f) para o período avaliado.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI OBTIDOS COM OS SENSORES ORBITAL E NÃO-ORBITAL EM *PIXELS* NÃO PUROS

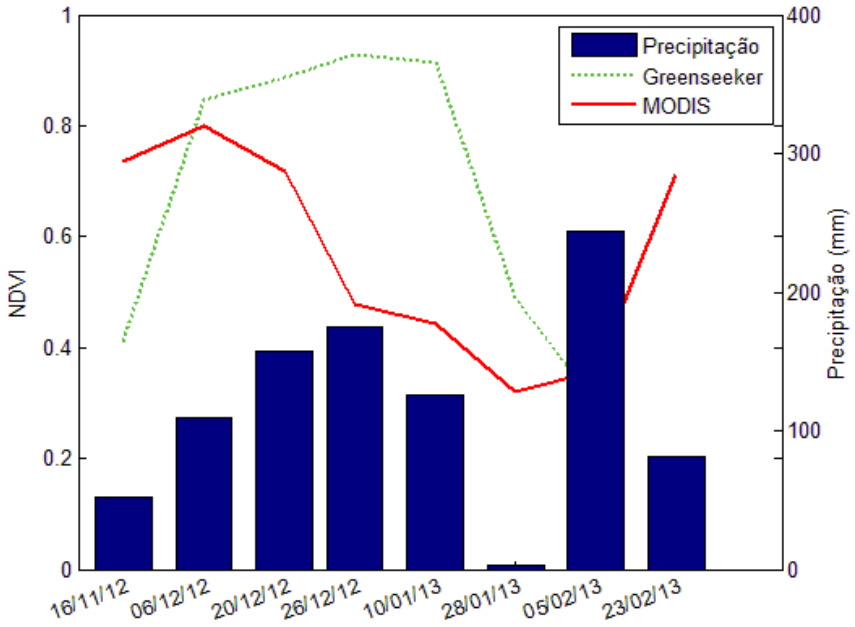


Figura 37 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 1 e precipitação acumulada do período.

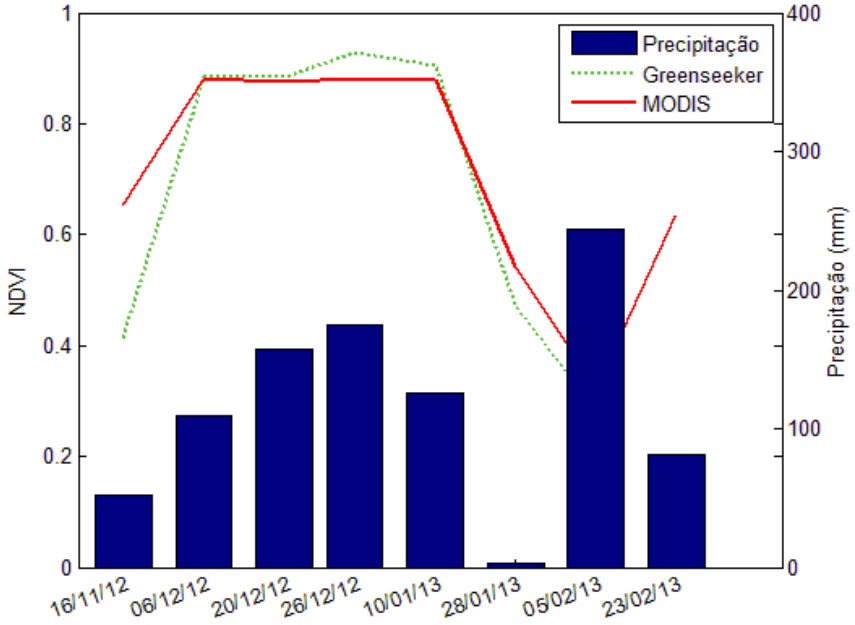


Figura 38 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 2 e precipitação acumulada do período.

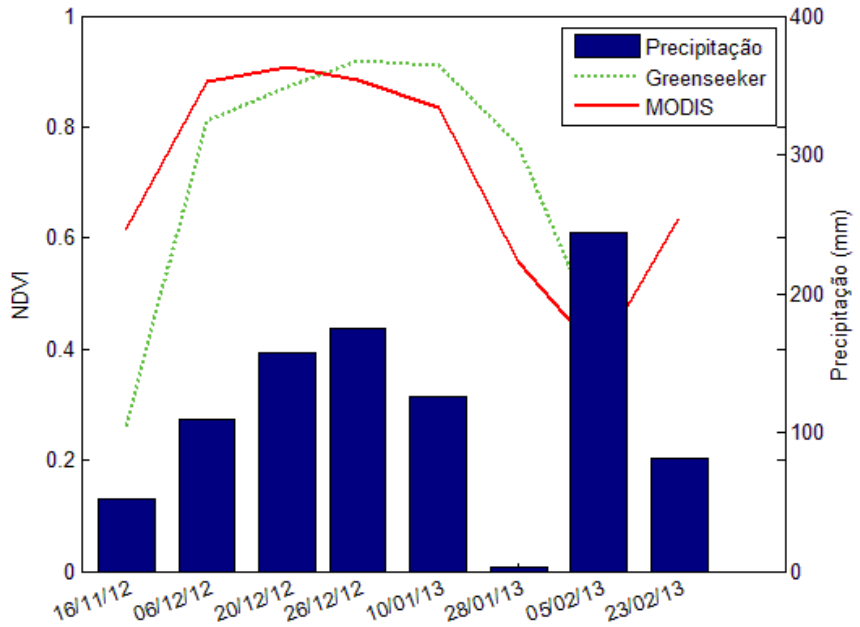


Figura 39 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 4 e precipitação acumulada do período.

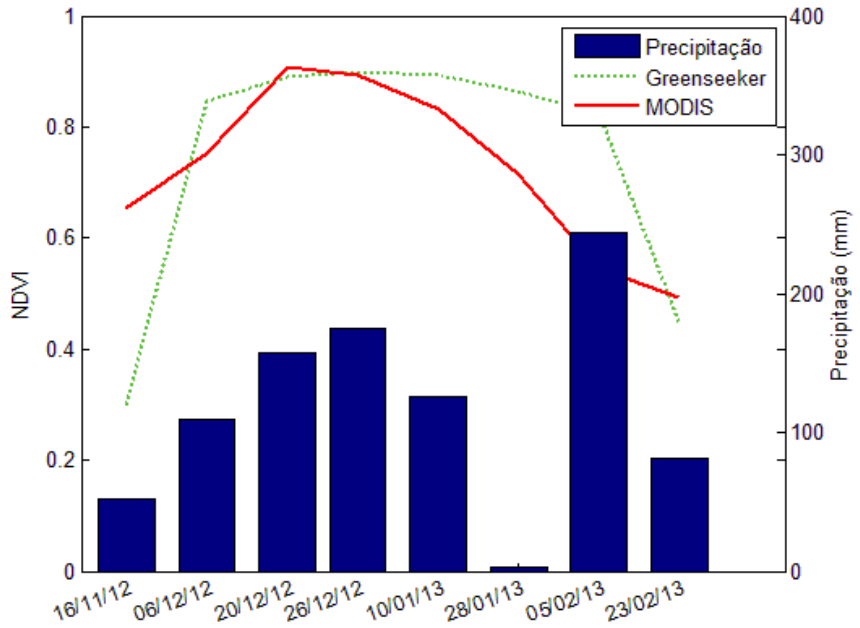


Figura 40 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 6 e precipitação acumulada do período.

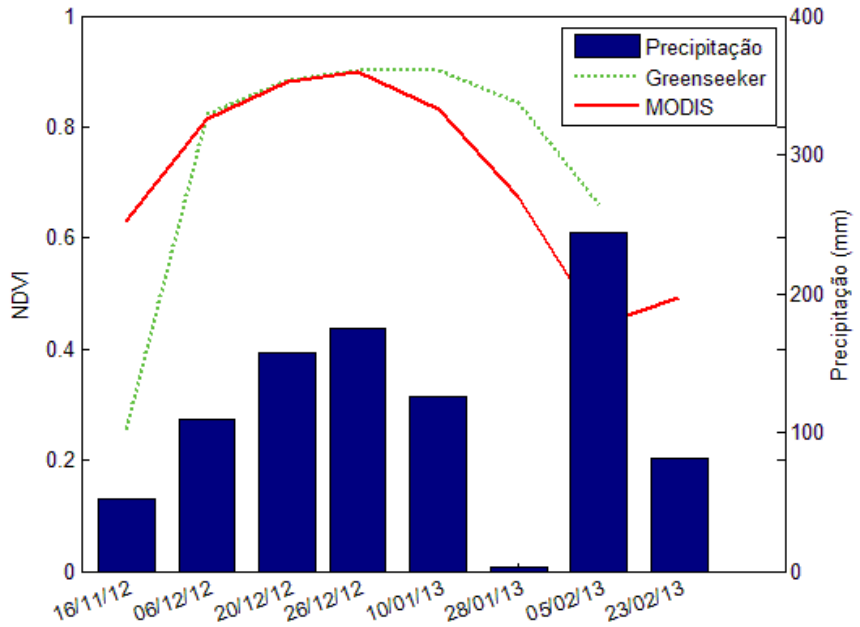


Figura 41 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 7 e precipitação acumulada do período.

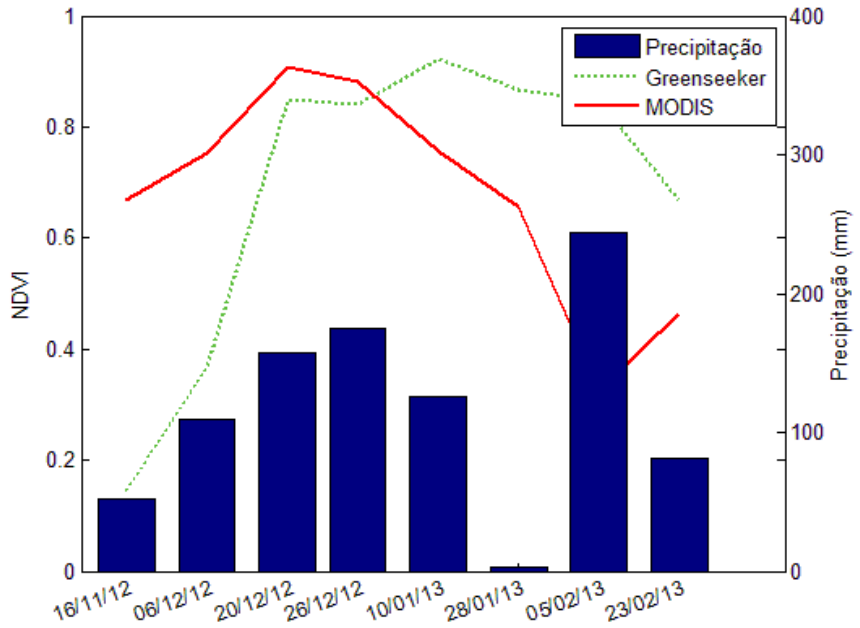


Figura 42 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 9 e precipitação acumulada do período.

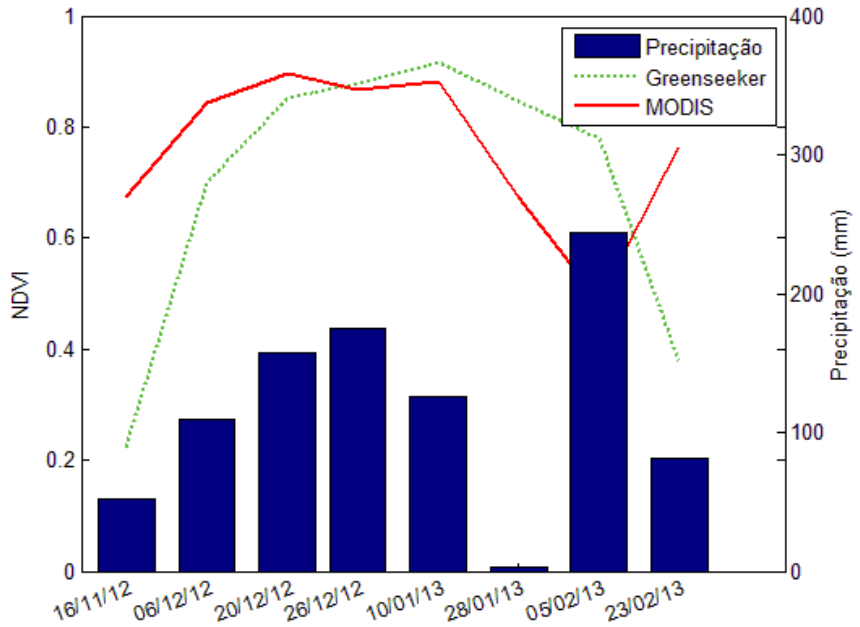


Figura 43 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 10 e precipitação acumulada do período.

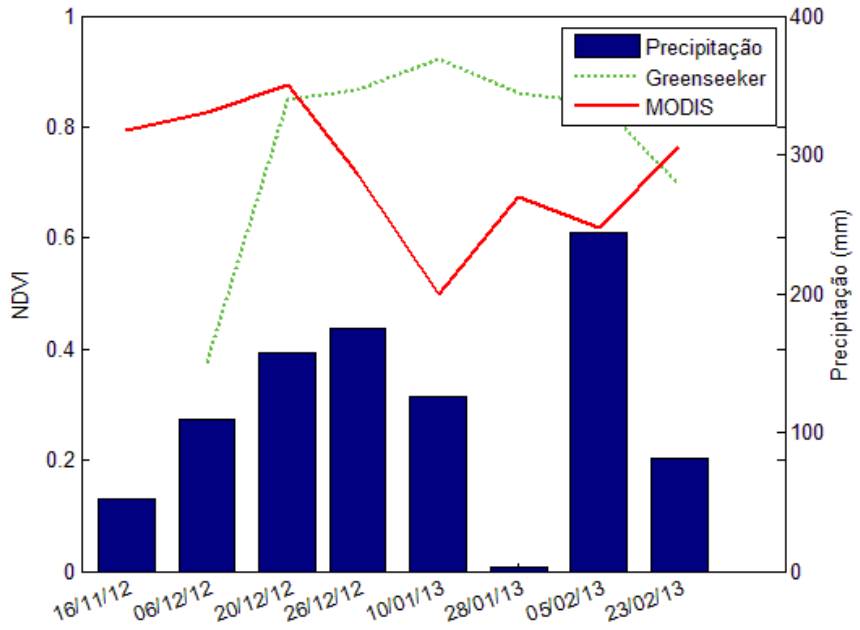


Figura 44 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 11 e precipitação acumulada do período.

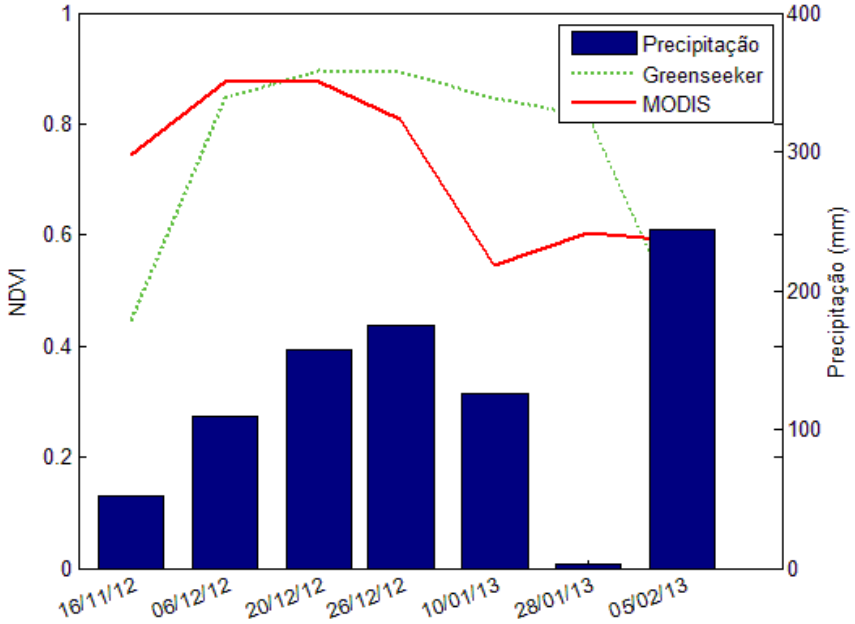


Figura 45 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 12 e precipitação acumulada do período.

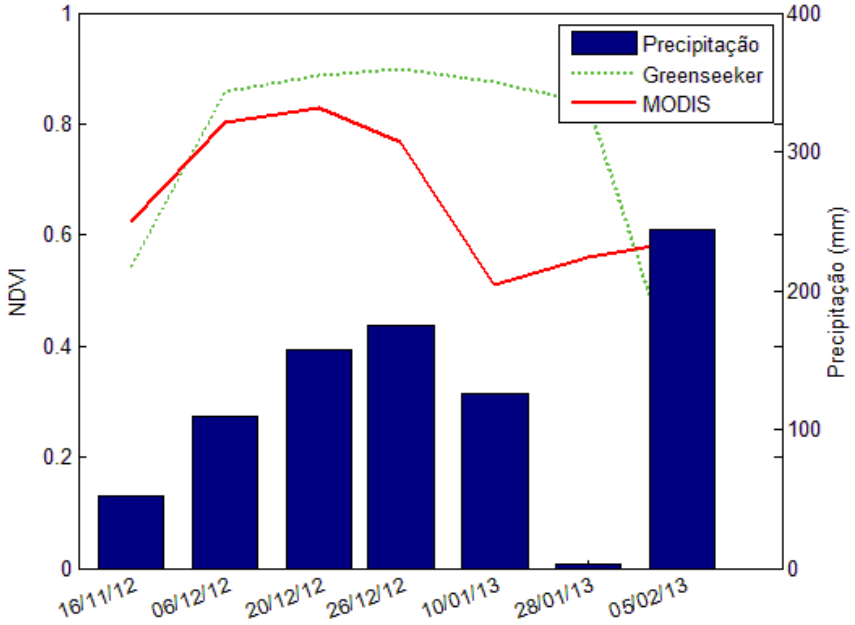


Figura 46 Perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI dos sensores orbital (MODIS) e não-orbital (GreenSeeker®) para o *pixel* 13 e precipitação acumulada do período.