



MICHEL EUSTÁQUIO DANTAS CHAVES

**USO DE DADOS MULTITEMPORAIS DE
ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA A
IDENTIFICAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS
NO TRIÂNGULO MINEIRO/ALTO
PARANAÍBA-MG**

LAVRAS-MG

2014

MICHEL EUSTÁQUIO DANTAS CHAVES

**USO DE DADOS MULTITEMPORAIS DE ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS
NO TRIÂNGULO MINEIRO/ALTO PARANAÍBA-MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Dra. Elizabeth Ferreira

Coorientador

Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Chaves, Michel Eustáquio Dantas.

Uso de dados multitemporais de índices de vegetação para a identificação de culturas agrícolas no Triângulo Mineiro/Alto Paranaína/MG / Michel Eustáquio Dantas Chaves. – Lavras : UFLA, 2014.

107 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Elizabeth Ferreira.

Bibliografia.

1. Agricultura. 2. Sensoriamento remoto. 3. Geoprocessamento.
4. Séries temporais. 5. Índices de vegetação. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 519.55

MICHEL EUSTÁQUIO DANTAS CHAVES

**USO DE DADOS MULTITEMPORAIS DE ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS
NO TRIÂNGULO MINEIRO/ALTO PARANAÍBA-MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 07 de agosto de 2014.

Dr. Antonio Augusto Aguilar Dantas UFLA

Dra. Margarete Marin Lordello Volpato Empresa de Pesquisa Agropecuária
de Minas Gerais - EPAMIG

Dra. Elizabeth Ferreira
Orientadora

LAVRAS-MG

2014

Dedico este trabalho aos meus Pais, Ansheridam e José Eustáquio.

Ao meu Irmão, Andrey.

Aos meus amigos.

A todos os meus professores e aos que me apoiaram ao longo desta etapa.

AGRADECIMENTOS

Rendo meus afetuosos agradecimentos a todos que acreditaram em mim, torceram e me incentivaram em mais esta etapa.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que me proporcionou condições de iniciar a caminhada e sempre me acompanhou em todos os momentos.

Especiais agradecimentos aos Professores Elizabeth Ferreira e Antonio Augusto Aguilar Dantas, cuja amizade e orientação constantes foram muito importantes e me renderam muitos conhecimentos.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo CAG-APQ 01560-12. Por meio deste projeto pôde-se obter suporte para obtenção e processamento dos dados e produtos VGT-S, NDWI e DMP da organização VITO (VEGETATION). O suporte se entende pelo financiamento de materiais solicitados no Projeto, que implementados no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento do DEG/UFLA facilitaram a execução desta dissertação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPQ pela concessão de bolsa.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, estudantes e funcionários.

Aos amigos, em geral.

Muito Obrigado!

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”. (Marcel Proust)

RESUMO

Para identificar diferentes áreas agrícolas, técnicas de sensoriamento remoto e de análise de séries temporais de índices de vegetação apresentam grande potencial, proporcionando mapear e monitorar ciclos fenológicos. Ultimamente, destaca-se o uso de séries temporais de dados provenientes de produtos compostos voltados à vegetação, tais como o MOD13Q1 do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e o VGT-S10, do sensor SPOT VEGETATION (Sattelite Pour l'Observation dela Tèrre), que disponibilizam índices de vegetação na forma de produtos compostos de 16 e 10 dias, respectivamente, livres de interferências atmosféricas. As séries temporais permitem avaliar o comportamento da vegetação por meio da verificação de sazonalidades e tendências nos ciclos fenológicos das culturas agrícolas. Este estudo avaliou a utilização de séries temporais de índices de vegetação dos produtos supracitados para a geração de perfis espectro-temporais e a posterior derivação de parâmetros do ciclo fenológico/agrícola para a geração de máscaras de cultivo, com o objetivo de mapear e identificar as áreas (em ha), ocupadas por cana-de-açúcar, soja, café e milho na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba-MG, entre os anos de 2009 e 2012. Foram utilizadas séries temporais dos índices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI) do MOD13Q1 e de NDVI, Normalized Difference Water Index (NDWI) e Dry Matter Productivity (DMP) do VGT-S10. Os resultados obtidos mostraram utilidade das séries temporais dos índices para monitorar o ciclo fenológico das culturas, tornando possível identificar as áreas destinadas ao plantio de cada cultivo pelo método da geração de máscaras de cultivo e aplicação de limiares de máximo e mínimo valor de corte, de acordo com as respostas espectro-temporais encontradas, indicando que, na comparação entre ambos, o MOD13Q1 foi, no geral, melhor no objetivo de identificar as áreas das culturas avaliadas na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Palavras-chave: Agricultura. Sensoriamento Remoto. Geoprocessamento. Séries temporais. Índices de vegetação.

ABSTRACT

The remote sensing and the time series analysis of the vegetation index are found to be potential in the identification of different agricultural areas, seeking to map and monitor their phenological cycles. Lately, the use of time series of data from composed products related to vegetation, such as the MOD13Q1 product from MODIS sensor, and the VGT-S10 product from SPOT VGT sensor, which provide vegetation indices as composed products of 16 and 10 days, respectively, free of atmospheric interferences, is highlighted. The time series allow the assessment of vegetation pattern, by examining the seasonality and tendency of crops phenology cycles. Thus, we assessed here the use of time series of vegetation indices in the generation of spectro-temporal profiles, and the subsequent derivation of parameters about phenological and/or agricultural cycles for generating culture masks, seeking to map and identify areas used for culturing sugarcane, soy, coffee and maize in Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba, State of Minas Gerais, Brazil. The study was performed for the years from 2009 to 2012, and time series of Normalized Difference Vegetation Index and Enhanced Vegetation Index obtained from the MOD13Q1 product, and Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Water Index and Dry Matter Productivity obtained from the VGT-S10 product, were used. According to results, the time series were found to be useful in monitoring the phenological cycle of crops. This made possible the identification of areas reserved for planting each crop, based on the culturing masks generation method, and use of threshold of maximum and minimum cut-off values, denoting that the MOD13Q1 product was, in general, the best in the identification of growing areas in Triângulo Mineiro.

Key-words: Agriculture. Remote sensing. Geoprocessing. Time series. Vegetation index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização da Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.....	44
Figura 2	Mapa de localização geográfica dos pontos utilizados para as análises.....	51
Figura 3	Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice NDVI do produto MOD13Q1, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados.....	58
Figura 4	Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice EVI do produto MOD13Q1, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados.....	64
Figura 5	Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no NDVI do produto VGT-S10, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2009 e outubro de 2011 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados.....	70
Figura 6	Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice NDWI do produto VGT-S10, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados.....	74

Figura 7 Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice DMP do produto VGT-S10, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados.....79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados de área plantada das culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho para os anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba	46
Tabela 2	Descrição das séries temporais dos produtos de acordo com os índices de vegetação, as datas para importação e o número de imagens geradas	49
Tabela 3	Localização geográfica e altitude dos pontos de cana analisados	51
Tabela 4	Localização geográfica e altitude dos pontos de soja analisados	52
Tabela 5	Localização geográfica e altitude dos pontos de café analisados	53
Tabela 6	Localização geográfica e altitude dos pontos de milho analisados	53
Tabela 7	Relação entre os dados obtidos com base em imagens geradas pelos índices de vegetação NDVI e EVI do sensor MODIS para as culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no Triângulo Mineiro entre os anos de 2010 e 2012	69
Tabela 8	Relação entre os dados obtidos com base em imagens do sensor SPOT VEGETATION para as culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no Triângulo Mineiro entre os anos de 2010 e 2012	84
Tabela 9	Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para a cana-de-açúcar em cada índice de vegetação	85

Tabela 10	Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de cana-de-açúcar.....	85
Tabela 11	Valores de área em hectare de cana-de-açúcar, de acordo com o dado oficial do IBGE e com os resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais ocasionados*	86
Tabela 12	Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para a soja em cada índice de vegetação.....	87
Tabela 13	Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de soja	88
Tabela 14	Valores de área em hectare de soja no dado oficial do IBGE e nos resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais ocasionados*	88
Tabela 15	Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para o café em cada índice de vegetação.....	90
Tabela 16	Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de café	90
Tabela 17	Valores de área em hectare de café no dado oficial do IBGE e nos resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais ocasionados*	91
Tabela 18	Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para o milho em cada índice de vegetação.....	92
Tabela 19	Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de milho	93

Tabela 20	Valores de área em hectare de milho no dado oficial do IBGE e nos resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais encontrados*94
-----------	--

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	Culturas agrícolas: importância e ciclo fenológico	20
3.1.1	Cultura da cana-de-açúcar	21
3.1.2	Cultura da soja	22
3.1.3	Cultura do café	25
3.1.4	Cultura do milho	26
3.2	Os Índices de vegetação	28
3.2.1	Normalized Difference Vegetation Index - NDVI	31
3.2.2	Enhanced Vegetation Index - EVI	33
3.2.3	Normalized Difference Water Index - NDWI	35
3.2.4	Dry Matter Productivity - DMP	36
3.3	Índices de vegetação aplicados às culturas agrícolas	38
4	MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1	Caracterização fisiográfica da área de estudo	44
4.2	Coleta de dados sobre os cultivos	45
4.3	O MOD13Q1	47
4.4	O VGT-S10	48
4.5	Processamento inicial dos produtos	49
4.6	Geração dos perfis temporais de índices de vegetação	50
4.7	Máscaras de cultivo	54
4.8	Validação dos resultados	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	Resultados obtidos pelo índice NDVI do produto MOD13Q1	57
5.1.1	Cana-de-açúcar	59
5.1.2	Soja	60
5.1.3	Café	61
5.1.4	Milho	63
5.2	Resultados obtidos pelo índice EVI do produto MOD13Q1	64
5.2.1	Cana-de-açúcar	64
5.2.2	Soja	65
5.2.3	Café	67
5.2.4	Milho	68
5.3	Comparações entre os índices NDVI e EVI do produto MOD13Q1	69
5.4	Resultados obtidos pelo índice NDVI do produto VGT-S10	69
5.4.1	Cana-de-açúcar	70
5.4.2	Soja	71

5.4.3	Café.....	72
5.4.4	Milho	73
5.5	Resultados obtidos pelo índice NDWI do produto VGT-S10.....	74
5.5.1	Cana-de-açúcar	75
5.5.2	Soja.....	76
5.5.3	Café.....	77
5.5.4	Milho	78
5.6	Resultados obtidos pelo índice DMP do produto VGT-S10	79
5.6.1	Cana-de-açúcar	80
5.6.2	Soja.....	81
5.6.3	Café.....	81
5.6.4	Milho	82
5.7	Comparações entre os índices NDVI, NDWI e DMP do produto VGT-S10	83
5.8	Máscaras de cultivo.....	84
5.8.1	Máscaras de cultivo de cana-de-açúcar.....	84
5.8.2	Máscaras de cultivo de soja	87
5.8.3	Máscaras de cultivo de café.....	89
5.8.4	Máscaras de cultivo de milho	92
6	CONCLUSÕES	96
	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países com maior representatividade no cenário agrícola mundial e vive um crescimento neste setor. Com a expansão da área dos cultivos e o aumento da produção nas últimas décadas, regiões específicas, dotadas de infraestrutura e suporte indispensáveis ao crescimento agrícola, passaram a se destacar.

A mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba é uma dessas regiões. Dotada de condições edafoclimáticas favoráveis e de logística privilegiada, contando com facilidade de estocagem e rodovias para escoamento da produção, exerce um papel importante na agricultura mineira e brasileira.

Com a crescente importância da agricultura na região e seu atual dinamismo, também, aumenta a preocupação em dispor de dados confiáveis acerca da extensão e distribuição espacial dos cultivos, no intuito de favorecer entidades de organização e planejamento, que dependem de maior precisão para adotar medidas adequadas de manejo e de políticas de apoio. A transparência nas informações sobre a produção orienta políticas governamentais e inibe especulações de estoques e de preços.

Em nível nacional, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é o responsável por produzir e disponibilizar estimativas oficiais de safras agrícolas, e o faz por meio do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), gerado com base em questionários e entrevistas realizadas com técnicos de órgãos, entidades do setor agrícola e produtores rurais.

Apesar da eficiência deste método, entende-se que o uso de dados, derivados de sensoriamento remoto e o desenvolvimento de métodos mais eficientes de análise, pode fornecer dados mais confiáveis acerca da produção agrícola, servindo como auxílio à identificação e ao monitoramento de culturas.

Neste contexto e atrelado às dimensões territoriais avaliadas, o sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta de auxílio importante, principalmente, por proporcionar avaliações multitemporais, dado o dinamismo da agricultura e por ser menos oneroso e mais ágil do que as avaliações *in loco*. Diversos são os trabalhos que mostram as vantagens do uso de imagens orbitais para gerar estimativas agrícolas e identificar áreas de cultivo, demonstrando a capacidade de caracterizar a fenologia da vegetação.

Sensores remotos tais como o MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e o SPOT VEGETATION, a bordo dos satélites TERRA e SPOT (Sattelite Pour l'Observation de la Terre), respectivamente, apresentam-se como ferramentas úteis à identificação de culturas e ao monitoramento de safras, por disponibilizar em índices de vegetação–minimizadores da variabilidade causada por solo, atmosfera e geometria de aquisição dos dados na forma de produtos derivados compostos, com maior qualidade de informação.

O MODIS, com 250 x 250 m de resolução espacial, apresenta o produto de vegetação MOD13Q1, em suas bandas 1 e 2, composto pelos índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Enhanced Vegetation Index (EVI), que resultam de observações efetuadas ao longo de intervalos regulares de 16 dias e da seleção dos pixels de “melhor qualidade”, livres de interferência atmosférica.

OSPOT Vegetation (VGT), com resolução espacial de 1 x 1 km, apresenta o VGT-S10, uma síntese de imagens obtidas, durante dez dias pelo sensor, que usa o algoritmo "Maximum Value Composite" (MVC) para selecionar os melhores valores de reflectância, gerando imagens com a menor interferência de nuvens possível dos índices de vegetação NDVI, Normalized Difference Water Index (NDWI) e Dry Matter Productivity (DMP).

Apesar do potencial destes sensores e índices, são escassos os trabalhos que os avaliem em conjunto para a identificação de áreas agrícolas. E, diante desse cenário, este trabalho aferiu a potencialidade dos produtos compostos de índices de vegetação MOD13Q1 e VGT-S10 para identificar as culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba entre os anos agrícolas de 2009 e 2012, utilizando tratamento e análise de séries temporais do ciclo fenológico das culturas.

2 OBJETIVOS

Poderia a agricultura ser avaliada por meio de dados multitemporais de média e alta resolução espectral? Este estudo foi realizado com o objetivo principal de utilizar séries temporais de índices de vegetação dos sensores MODIS e SPOT VEGETATION para identificar e distinguir áreas de cultivo de cana-de-açúcar, soja, café e milho na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. A análise foi feita com o uso de imagens dos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012, e os resultados foram validados e avaliados com base nos dados oficiais dos cultivos, fornecidos pelo IBGE.

Como objetivos específicos teve-se:

- a) organizar séries temporais de índices de vegetação, utilizando os produtos VGT-S10 e MOD13Q1, que possuem resolução temporal de 10 e 16 dias e espacial de 1km² e 250m², respectivamente;
- b) atestar se as informações geradas são úteis ao monitoramento da cultura e à identificação das fases de cultivo;
- c) averiguar se o comportamento das culturas foi padrão no período estudado e verificar a influência da precipitação no comportamento das culturas;
- d) comparar as máscaras de cultivo geradas com base nos dois produtos e avaliar as diferenças encontradas;
- e) estabelecer relações entre os índices de vegetação e os estágios fenológicos das culturas e responder quais deles produziram as máscaras de culturas mais precisas e confiáveis, de acordo com a validação;
- f) desenvolver uma metodologia, baseada na análise dos índices de vegetação, que auxilie na discriminação de cultivos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Culturas agrícolas: importância e ciclo fenológico

Compreender o ciclo das culturas agrícolas e as transformações que ocorrem nos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas permite relacionar os resultados obtidos por meio dos índices de vegetação aos elementos fisiológicos da planta, a aspectos climáticos e ao desempenho produtivo de forma inteligente.

Por meio do conhecimento dos ciclos, é possível observar o período de plantio, a sequência de estádios fenológicos e o período de colheita das culturas. A compreensão do ciclo das culturas fornece subsídios para que seja possível tecer considerações mais apuradas e compreender melhor os resultados encontrados no processamento de dados geoespaciais.

Segundo Monteiro (2009) conhecer também a agrometeorologia dos cultivos é essencial para a geração de informações meteorológicas e climáticas adequadas às particularidades de diferentes culturas.

Tais informações aplicadas no planejamento, no processo de tomada de decisão e para aumento da resiliência da produção, possibilitam uma agricultura mais eficiente, mais produtiva, com menor risco de perdas e com maior sustentabilidade.

Neste contexto, os serviços nacionais de meteorologia são elementos essenciais, não apenas como fornecedores de dados meteorológicos ou de previsões do tempo e do clima, mas também como geradores de produtos agrometeorológicos específicos para cada tipo de cultura, por meio de Sistemas de Informações Agrometeorológicas.

3.1.1 Cultura da cana-de-açúcar

Diante do crescimento do setor sucroalcooleiro e sua demanda por todo o mundo, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) atingiu outro nível de importância, sendo utilizada como matéria-prima, principalmente, para a produção de açúcar, além do etanol como fonte de energia renovável.

A cana-de-açúcar brasileira é destaque em nível internacional, pois o país é o maior produtor mundial do cultivo, respondendo por 33% da produção total mundial, com destaque para o Estado de São Paulo, que, em 2011, produziu 51,87% do montante de 8.520,5 mil hectares plantados no país (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2011).

O Estado de Minas Gerais fechou o ano de 2011 como o terceiro maior produtor de cana-de-açúcar no Brasil, com 8,47% da produção nacional, totalizando 721,86 mil hectares (CONAB, 2011). A região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba é considerada uma área de expansão do cultivo no Brasil, com crescimento importante nos últimos anos, de acordo com os últimos levantamentos sistemáticos da produção, realizados pelo IBGE, onde se observa uma tendência expansionista do cultivo em função de sua viabilidade e retorno econômico em relação a outros, como o milho, outrora tradicional na região.

O desenvolvimento da cana-de-açúcar depende muito da disponibilidade hídrica durante o ciclo. A falta de água no solo acarreta redução da produtividade, principalmente, no início do desenvolvimento da cultura, período sensível ao déficit hídrico. Diante disso, é preciso considerar de maneira especial o acúmulo de pluviosidade nas fases do ciclo deste cultivo.

O ciclo da cana-de-açúcar inicia-se com o plantio e passa pelas fases de brotação, perfilhamento e maturação até receber o primeiro corte. Após este primeiro corte, os estádios de corte seguintes são denominados de cana-soca,

onde a cada corte ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo estágio de corte (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

No estágio de brotação, o broto da cana-de-açúcar desenvolve-se em direção à superfície do solo, emergindo. Isso ocorre entre 20 e 30 dias após o plantio. A fase de perfilhamento inicia-se cerca de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias e proporciona ao cultivo o número necessário de colmos para uma boa produção. Nesse estágio, ocorre o estabelecimento da cultura, com a permanência dos brotos mais fortes.

Em seguida ocorre o estágio de crescimento dos colmos, dividido em crescimento rápido (entre o primeiro decêndio de dezembro e o terceiro de janeiro) e lento (entre o primeiro decêndio de fevereiro e o terceiro de março). Os perfilhos sobreviventes ganham altura e iniciam o acúmulo de açúcares da base em direção ao ápice da planta, absorvendo água e nutrientes, até a plena maturação dos colmos (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

Por fim, ocorre a colheita e a conseqüente queda de biomassa e vigor vegetativo emitidos pela cana-de-açúcar. A esta altura, a estiagem natural do período, também, contribui para a redução da resposta espectral. Esse quadro é postergado pela rebrota e o início das chuvas.

3.1.2 Cultura da soja

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*) é uma planta leguminosa, dicotiledônea, originária da China e, historicamente, uma cultura de extrema importância econômica para o Brasil. No início da década de 1930, a soja passou a ser intensamente cultivada como cultivo comercial no Rio Grande do Sul, onde encontrou condições ideais para o seu desenvolvimento e só a partir dos anos 80, a soja estendeu-se para o Cerrado, chegando ao Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (CONAB, 2009).

A expansão para essa nova fronteira agrícola deveu-se aos estudos de fertilização dos solos do Cerrado, à sua topografia plana, favorável à mecanização e ao desenvolvimento de plantas aptas à região (CENTRO DE INTELIGÊNCIA DA SOJA - CISOJA, 2009). Hoje, a região do Cerrado tornou-se a maior produtora de soja no país e a mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba contribui para essa produção.

O avanço tecnológico e as condições climáticas favoráveis às lavouras são os responsáveis por estes resultados. Embora os principais fatores que induziram o produtor da região a ampliar a área de cultivo da soja tenham sido o menor custo por hectare e o maior valor de mercado comparado ao milho, chama atenção a sua maior liquidez; sendo uma cultura mais resistente à estiagem e de cultivo menos oneroso do que o milho (CONAB, 2009).

O ciclo da soja é dividido em dois períodos principais: o período vegetativo (V) e o período reprodutivo (R). A fase vegetativa é o período da emergência da plântula até a abertura das primeiras flores, e a fase reprodutiva compreende o período do início da floração até a maturação. Cada período é desmembrado em diferentes estádios fenológicos.

Seu desenvolvimento, também, depende da disponibilidade de água, principalmente, nos estádios de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Déficits hídricos expressivos provocam rendimentos menores, por isso indica-se semear apenas cultivares adaptadas à região e ao solo; semear em época recomendada e de menor risco climático e adotar práticas que favoreçam o armazenamento de água no solo, como a irrigação (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2010).

Na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, o plantio da soja costumeiramente inicia-se no final de setembro e termina no início de dezembro, com recomendações para que seja efetuado até meados de novembro, para obter melhores rendimentos (EMBRAPA, 2010). O mês de dezembro representa o

final do período vegetativo para a maior parte das cultivares utilizadas nesta região. Nesse mês os nós vegetativos encontram-se formados.

Em seguida, ocorrem os estádios de floração, enchimento de grãos e maturação fisiológica, nos meses de janeiro e fevereiro para a maioria dos cultivares. Quando ocorre a maturação plena, inicia-se a colheita, efetuada entre janeiro e abril (EMBRAPA, 2010). A cultura de soja na região é intercalada com milho safrinha, o milho de sequeiro cultivado na segunda safra, plantado em março e colhido entre maio e junho (BRASIL, 2007).

Na região é praticado o vazio sanitário da soja, que é o período de ausência total de plantas vivas de soja, excluindo-se as áreas de pesquisa científica e de produção de semente genética, que são devidamente monitoradas e controladas. Adotado pela Secretaria de Estado de Agricultura Pecuária e Abastecimento como medida de manejo, o vazio sanitário representa uma proteção contra a ferrugem asiática, provocada pelo fungo da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), que causou um prejuízo de 2 bilhões de dólares à sojicultura brasileira na safra 2005/2006 (CISOJA, 2009).

Desde então, durante o período de vazio sanitário, que vai de 1º de julho a 30 de setembro, todas as plantas de soja existentes nas propriedades devem ser erradicadas sob pena de multa em caso de não cumprimento por parte dos produtores - por meio de produtos químicos e equipamentos, pois uma solução de controle da praga ainda não foi encontrada e isso compromete a sanidade da produção.

Sanches (2004) cita que a soja, em fase de pleno desenvolvimento, é facilmente diferenciada da cana-de-açúcar e do milho, porque a arquitetura de suas plantas, quantidade de folhas e recobrimento do solo divergem das duas outras culturas.

3.1.3 Cultura do café

O café (*Coffea arabica L.*) é um dos cultivos mais tradicionais e importantes para o Brasil e para Minas Gerais, destacando-se pelas divisas geradas, pela geração de renda ao produtor e pelo número de empregos gerados no campo. O Brasil mantém-se como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de café, embora sua participação no mercado internacional esteja decrescendo, segundo dados institucionais dos levantamentos de safras.

Minas Gerais é o Estado brasileiro que mais produz café. Tendo uma notável vocação cafeeira, é responsável por mais de 50% da safra brasileira, possuindo cerca de 1.214,0 mil hectares plantados com café, predominando a espécie arábica com 98,6%. A área destinada ao café em MG representa 52,1% da área cultivada com café no país (CONAB, 2012).

O cultivo de café cresce na região de estudo. Segundo CONAB (2012), o volume de 199.045 hectares de café plantados na região em 2013 foi 2,5% maior em relação à safra de 2012 e 8,5% maior em relação à safra de 2011.

A respeito do desenvolvimento e ciclo fenológico do café, é preciso considerar que o café arábica (*Coffea arabica L.*), única variedade cultivada na região, leva, segundo Camargo e Camargo (2001), dois anos para completar o ciclo fenológico de frutificação, ao contrário da maioria das plantas que completam o ciclo reprodutivo no mesmo ano fenológico. Assim, o cafeeiro dispõe de seis fases fenológicas distintas, envolvendo os dois anos fenológicos, iniciados em setembro do primeiro ano do biênio.

Camargo e Camargo (2001) explicam que a primeira fase vegetativa vai de setembro a março. A segunda fase vegetativa vai de abril a agosto, quando ocorre a indução das gemas vegetativas dos nós formados na primeira fase para gemas reprodutivas e a maturação das gemas reprodutivas.

A terceira fase na esquematização proposta é a de florada e expansão dos frutos, que vai de setembro a dezembro. Os autores citam que as floradas ocorrem cerca de 8 a 15 dias, após o aumento do potencial hídrico nas gemas florais (choque hídrico), causado por chuva ou irrigação.

A quarta fase proposta é a de granação dos frutos, que vai de janeiro a março e a quinta fase é a de maturação dos frutos, logo após a florada principal, que determina o pico máximo do ciclo da cultura e o início da colheita. Após o término da colheita, ocorre a sexta e última fase, a de senescência e morte dos ramos produtivos, não primários, geralmente, entre em julho e agosto.

Com o desenvolvimento e o passar das fases, o comportamento espectral se altera, podendo fornecer informações essenciais à discriminação do cafeeiro em índices de vegetação.

3.1.4 Cultura do milho

O milho (*Zea mays L.*) é considerado importante para agricultura brasileira. Em Minas Gerais, o milho é cultivado especialmente para atender as demandas da suinocultura e avicultura, nas quais o Estado possui grande representatividade, servindo de alimento aos animais.

A cultura do milho possui relação direta com a água, sendo uma cultura bastante sensível à disponibilidade hídrica no solo, que, por sua vez, está relacionada ao regime de chuvas do local (ALVES et al., 2011). O estresse hídrico na fase de florescimento diminui o rendimento da cultura.

No Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, a maior parte de sua produção é realizada em condições de sequeiro, com plantio em setembro e outubro, como cita Faria et al. (2000), estando sujeito à instabilidade climática, o que torna importante compreender o efeito da deficiência hídrica no seu desenvolvimento.

Em virtude de estreita relação entre o milho e a água, a semeadura deve ser feita no tempo certo, para maximizar a produção. No Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, este período ocorre entre setembro e novembro, sendo a prática, preferencialmente, executada até meados de outubro. O sistema mais utilizado é o de semeadura direta, principalmente, em grandes áreas, entretanto, os pequenos produtores, ainda, adotam o sistema convencional (BRASIL, 2007).

Magalhães e Durães (2006) descreveram o ciclo do milho em todos os seus estádios de crescimento, desde a sua emergência até a maturidade fisiológica. Após a semeadura, ocorre a fase de germinação e emergência, na qual as sementes absorvem água e começam a surgir. Aproximadamente duas semanas após este período, acontece o estágio V3, no qual se define o número máximo de grãos e a produção potencial. No V5, a iniciação das folhas e espigas é completa e o pendão é visível microscopicamente. A disponibilidade de água neste estágio é fundamental, porém, em excesso, pode matar a planta.

Nos estádios V6 e V8 acontece o crescimento do sistema radicular nodal e a definição no número de fileiras de grão. No V9 e no V10, a planta inicia um crescimento contínuo, com acúmulo de nutrientes. Nessas fases há uma grande demanda por água e nutrientes para satisfazer as necessidades da planta.

No V12, define-se o número de grãos em potencial em cada espiga e a planta atinge cerca de 90% da área foliar. Este é o período mais importante e crucial para o desenvolvimento da planta em termos de rendimento (MAGALHÃES; DURÃES, 2006).

No estágio V17, são visíveis as extremidades das espigas no caule e a extremidade do pendão. No V18, a planta encontra-se a uma semana do florescimento e o desenvolvimento da espiga continua em ritmo acelerado. Estresse hídrico nesses períodos pode afetar mais o desenvolvimento do óvulo e espiga que o desenvolvimento do pendão e reduzir a produção de grãos.

O estágio seguinte é o de pendramento, onde a planta atinge o máximo desenvolvimento e crescimento. Nessa fase, o estresse hídrico, a ocorrência de temperaturas acima de 35° C e encharcamentos podem reduzir drasticamente a produção.

Nos estádios de embonecamento e polinização e R2, o número de óvulos fertilizados é determinado e a espiga está próxima de atingir tamanho máximo. No R3, define-se a densidade dos grãos, que apresentam rápido acúmulo de matéria seca. O crescimento ocorre em decorrência da expansão e enchimento das células do endosperma com amido. No estágio R4, os grãos continuam desenvolvendo-se rapidamente, acumulando amido e chegando a estar com 70% de umidade e metade do peso que atingirão na maturidade.

No estágio F5, as plantas apresentam em torno de 35% de matéria seca. O milho colhido nessa fase apresenta as vantagens de apresentar aumento na produção de matéria seca por área; decréscimo nas perdas de armazenamento e aumento significativo no consumo voluntário da silagem produzida. Neste estágio, todos os grãos na espiga alcançam maior peso seco e vigor, e inicia-se o processo de senescência natural das folhas das plantas, que vão perdendo, gradativamente, a cor verde. O ponto de maturidade fisiológica caracteriza o momento ideal para a colheita.

3.2 Os Índices de vegetação

Desde os anos 1960, cientistas do mundo todo vêm extraindo e modelando vários parâmetros biofísicos da vegetação por meio de dados de sensoriamento remoto. Jensen (2000) faz uma revisão dos diversos esforços significativos empregados visando desenvolver sensores e algoritmos de processamento visual e digital de imagens para extrair informações biofísicas da vegetação com base em dados de sensoriamento remoto.

Os sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo do satélite TERRA e SPOT VEGETATION, a bordo do satélite SPOT (Satellite Pour l'Observation de La Terre), são úteis a esse campo científico, pois os índices derivados de suas imagens possuem características que favorecem o monitoramento e a discriminação culturas.

Jaboinski (2011) cita o crescimento do MODIS no estudo da agricultura, principalmente, por ter as resoluções espacial e temporal compatíveis com o tamanho das lavouras e sua dinâmica temporal. Do mesmo modo, Maisongrande, Duchemin e Dedieu (2004) destacam que o SPOT VEGETATION ganhou espaço no estudo da agricultura por auxiliar diretamente no monitoramento e na discriminação de cultivos.

Entre os produtos, provenientes das imagens orbitais, estão os índices de vegetação, com base nos quais se pode analisar diretamente o comportamento da vegetação. Estes índices ganham cada vez mais espaço nos dias atuais, sendo ferramentas essenciais ao estudo de culturas agrícolas, que com suas distintas características, são alvos constantes do avanço técnico-científico em razão, principalmente, de sua importância econômica.

Wiegand et al. (1974) os classifica como o resultado de transformações lineares do fator de refletância, obtido de duas ou mais bandas espectrais, envolvendo soma, razão, diferença ou qualquer outra relação matemática. Huete e Justice (1999) citam que, idealmente, um índice de vegetação deve:

- a) maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas de forma linear, para que a mesma seja fidedigna para uma grande amplitude de condições da vegetação e facilite a validação e a calibração do índice;

- b) normalizar ou modelar efeitos externos, tais como o ângulo solar, o ângulo de visada e as interferências atmosféricas, de modo a permitir comparações espaciais e temporais;
- c) normalizar efeitos internos, tais como variações no substrato abaixo do dossel, incluindo topografia, solos, e diferenças quanto à vegetação senescente;
- d) ser acoplável a algum parâmetro biofísico mensurável, tais como a biomassa, o IAF, para validação e controle de qualidade.

Ponzoni (2001) enfatiza que, por minimizarem a variabilidade causada por fatores externos, os índices de vegetação são frequentemente utilizados para descrever a relação entre os dados obtidos por meio de sensoriamento remoto e as características da vegetação, valendo-se da informação contida nas refletâncias de dosséis referentes às bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo.

Wiegand et al. (1974) explica que um dos diferenciais dos índices de vegetação é a sua capacidade de aplicação multitemporal, sintetizando a informação contida em imagens multiespectrais de uma série histórica. Isso facilita, por exemplo, a discriminação de áreas agrícolas por meio da análise das variações ao longo do ciclo de uma dada cultura em função das mudanças fenológicas ocorridas durante o período.

Conforme Gusso, Fonseca e Fontana (2006), existem variações na fisiologia das plantas que não são perceptíveis visualmente, mas podem ser detectadas de forma diferente pelo sensoriamento remoto, em função do posicionamento e largura das bandas do vermelho e do infravermelho.

Em suma, compreender as características das culturas e seus ciclos, por meio das favoráveis características dos sensores, auxilia na compreensão dos

perfis gerados pelos índices de vegetação, descritos a seguir e na identificação de culturas agrícolas.

E, de fato, a dinâmica espectro-temporal das culturas agrícolas tem sido monitorada por meio da aplicação multitemporal de índices de vegetação, o que possibilita maior entendimento das condições da vegetação ao longo de seu ciclo fenológico, como se encontra na literatura em Adami (2010), Esquerdo, Zullo Júnior e Antunes (2011), Fontana, Berlato e Bergamashi (1998), Rizzi e Rudorff (2007a) e Xavier et al. (2006), entre outros.

3.2.1 Normalized Difference Vegetation Index - NDVI

Entre os diversos índices de vegetação, destaca-se o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) formulado por Rouse et al. (1974), por ser o mais utilizado. É obtido com base na razão entre a subtração e a soma das refletâncias das bandas da região do infravermelho próximo e do vermelho do espectro eletromagnético.

O NDVI é calculado por meio da Equação 1, descrita a seguir:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (1)$$

Em que: IVP e V representam a refletância nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente (ROUSE et al., 1974).

Os valores de NDVI variam de -1 a 1. Conforme Lillesand e Kiefer (1999), para vegetações densas, como lavouras bem desenvolvidas, por refletirem pouca radiação na banda do vermelho e muita radiação na banda do infravermelho próximo, os valores de NDVI tendem a 1, e que para um solo exposto, como uma lavoura após a colheita, os valores de NDVI tendem a 0,

visto que estas áreas refletem bastante energia tanto no vermelho quanto no infravermelho próximo.

O NDVI é mais sensível do que outros índices à presença de pigmentos que participam dos processos fotossintéticos, como a clorofila, a ruídos aditivos, tais como espalhamentos e absorções atmosféricas e, também, às condições do brilho de fundo do dossel (HUETE et al., 2002). Além disso, é capaz de minimizar determinadas fontes externas de ruído como, por exemplo, sombras de nuvens, e se correlacionar bem com a biomassa (JUSTICE et al., 1998).

Para Ponzoni e Shimabukuro (2010), é possível verificar as mudanças na fenologia e na diminuição de biomassa, baseadas nas variações no comportamento temporal/espectral da vegetação e na alteração nos valores de NDVI.

Afirmam que, como ferramenta para o monitoramento da vegetação, o NDVI é utilizado para construir os perfis sazonal e temporal do seu comportamento, permitindo comparações interanuais entre eles, possibilitando detectar atividades sazonais e fenológicas de culturas, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência, potencial que contribui muito para este estudo.

O NDVI do MODIS é obtido das bandas espectrais do vermelho (0,62-0,67 μm) e do infravermelho próximo (0,841 - 0,876 μm). Já, o NDVI do SPOT é obtido das faixas do vermelho (0,61-0,68 μm) e infravermelho próximo (0,79 - 0,89 μm).

O NDVI possui características que o credenciam ao monitoramento e à identificação de culturas agrícolas, a fim de representar a dinâmica multitemporal da vegetação, proporcionando o reconhecimento de estádios fenológicos como o de crescimento vegetativo e o de senescência.

Wardlow e Egbert (2008) ressaltaram que a eficiência dos dados MODIS/NDVI na geração de séries espaço-temporais aplicadas, para separar

culturas de verão, é resultante da maior diferença espectral que ocorre nas fases de baixa a intermediária biomassa, correspondentes ao início do vigor vegetativo e à senescência das culturas, estádios esses que não são influenciados pela saturação do NDVI.

Mas o NDVI, também, possui limitações. Huete et al. (2002) e Moreira (2003) citam que sua rápida saturação o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal, com base em determinado estágio de desenvolvimento, fator que torna importante a utilização de outros índices em conjunto.

3.2.2 Enhanced Vegetation Index - EVI

O Enhanced Vegetation Index (EVI) foi desenvolvido por Justice et al. (1998) com o objetivo de otimizar o sinal da vegetação e minimizar as limitações do NDVI referentes aos problemas decorrentes da saturação da imagem, observados, sobretudo, em áreas densamente vegetadas, por influência de efeitos atmosféricos, do substrato e da geometria de aquisição, sendo um índice de vegetação mais sensível à estrutura do dossel (HUETE et al., 2002).

O índice EVI, assim como o NDVI do produto MODIS, varia numericamente entre -1 e 1 e valores negativos representam baixo vigor vegetativo e valores positivos representam alto vigor. Porém, nos produtos MODIS os valores são distribuídos com um fator multiplicador igual a 10.000. Neste trabalho, foi feita a transformação dos valores para a escala real dos índices, que variam de -1 a 1.

O EVI é calculado por meio da Equação 2, segundo (JUSTICE et al., 1998):

$$EVI = G \frac{IVP - V}{IVP + C1 * V - C2 * A + L} \quad (2)$$

Em que, IVP = refletância do infravermelho próximo, V = refletância do vermelho; A = refletância do azul; C1 = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho; C2 = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul; L = fator de ajuste para o solo; G = fator de ganho. Os valores de coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são: L = 1, C1 = 6, C2 = 7,5 e o fator de ganho G = 2,5 (JUSTICE et al., 1998).

Assim, o EVI é obtido da combinação das bandas do vermelho (0.62-0.67 μm), do infravermelho próximo (0,841 - 0,876 μm) e, também, do azul (0,459 - 0,479 μm) (HUETE; JUSTICE, 1999).

Huete et al. (2002) afirmam que o EVI apresenta substancial melhora na sensibilidade às alterações do dossel em relação ao NDVI, principalmente, em áreas de maior densidade de biomassa. Wardlow, Egbert e Kastens (2007) afirmam que apesar disso, a diferença entre a sensibilidade dos dois índices não é tão evidente ao se avaliar seu comportamento sobre o monitoramento de culturas agrícolas.

Simões, Rocha e Lamparelli (2009) constataram que o uso do EVI é importante para comparar com os resultados do NDVI, visto que por minimizar as variações de substrato e manter a sensibilidade em coberturas de vegetação densas, o EVI é capaz de revelar características e variações fenológicas não reveladas no NDVI.

O EVI conta com otimização do sinal da vegetação, tendo reduzidas as influências atmosféricas e do solo, e o NDVI apresenta alguns fatores limitantes, como a existência de pontos de saturação e a interferência atmosférica que é diferenciada nas regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Dessa forma, em razão de interferências, é comum que os valores do NDVI sejam mais elevados do que os do EVI de um mesmo pixel. Segundo

Huete e Justice (1999), estes dois índices de vegetação se complementam e melhoram a extração de parâmetros biofísicos dos dosséis.

3.2.3 Normalized Difference Water Index - NDWI

A presença de água no dossel vegetal é outro importante parâmetro da vegetação que pode ser utilizado no processo de avaliação do comportamento da vegetação e discriminação de culturas. E ela pode ser detectada e quantificada por meio da relação entre a absorção e a reflexão entre bandas espectrais distintas de um sensor.

Proposto por Gao (1996), para complementar o índice de vegetação NDVI, o NDWI é o índice de vegetação ligado à água mais utilizado. Está relacionado com o conteúdo de água presente nas folhas e se destaca no monitoramento do estresse hídrico da vegetação, pelo fato de que as bandas que o constituem – a do infravermelho próximo e a do infravermelho médio - são altamente correlacionadas com o conteúdo de água do dossel vegetal, conseguindo acompanhar melhor as mudanças na biomassa vegetal, na estimativa da quantidade de água em culturas agrícolas e estresses de umidade das plantas do que outros índices, como o NDVI.

Jackson et al. (2004) observaram saturação do NDVI enquanto o NDWI continuava registrando transformações ocorridas no conteúdo de água de áreas plantadas com milho e soja.

O NDWI do produto VGT-S10, do sensor SPOT VEGETATION é obtido, com base na razão entre as bandas do infravermelho próximo e infravermelho médio (0,79 - 0,89 μm e 1,58 - 1,75 μm). Na Equação 4 mostra-se essa razão entre as bandas para a definição do NDWI.

$$NDWI = \frac{IVP - IVM}{IVP + IVM} \quad (3)$$

Em que: IVP e IVM correspondem, respectivamente, às bandas do infravermelho próximo e do infravermelho médio (GAO, 1996).

Por ser mais um índice normalizado, o NDWI, também, varia entre -1 e 1, mas valores negativos indicam uma cobertura sem presença de água e positivos apresentam alto teor de umidade. Segundo Gao (1996), o NDWI varia quase linearmente com a espessura da lâmina da água. Dessa forma, esse índice tem se destacado no monitoramento do comportamento hídrico.

Comparado ao NDVI, o NDWI é menos sensível a efeitos atmosféricos, se constituindo em uma importante ferramenta a ser utilizada em estudos relacionados ao vigor vegetativo. Por ser formulado por bandas que o correlacionam bem com o conteúdo de água do dossel vegetal, indica mudanças na biomassa e valores oscilantes de umidade nas plantas (GAO, 1996).

3.2.4 Dry Matter Productivity - DMP

O índice Dry Matter Productivity (DMP) constitui-se de imagens do produto VGT-S10 do sensor SPOT VEGETATION, compostas a cada dez dias. Possui cobertura global com resolução espacial de 1 km. Disponibilizado pela VITO, o produto atual fornece dados desde 2009 (FLEMISH INSTITUTE FOR TECHNOLOGICAL RESEARCH - VITO, 2013).

O DMP reflete o aumento diário da biomassa da matéria seca da vegetação e é expresso em quilogramas de matéria seca por hectare por dia (kgMS/ha/dia). Imagens DMP são resultantes de uma combinação de dados de sensoriamento remoto com dados meteorológicos. Quando as culturas são saudáveis, tendo abundância em água e nutrientes, a produção de matéria seca é proporcional à quantidade de luz recebida (VITO, 2013).

A utilização do índice DMP é voltada, principalmente, para monitoramento de culturas agrícolas e estimativas de rendimento, sendo,

também, bastante utilizado para avaliar o rendimento de pastagens destinadas ao consumo do gado, por estar diretamente relacionado com a biomassa. Os valores do índice variam em uma escala entre 0 e 327,67 kgMS/ha/dia, que indica a produção de biomassa. Maiores valores representam uma taxa de crescimento mais elevada. A Equação 4 representa como é feito o cálculo do DMP:

$$DMP = R_1 \cdot 0,48 \cdot fAPAR \cdot \epsilon (T_{12}, T_{24}) \quad (4)$$

Em que: R_1 : é a radiação solar de ondas curtas de entrada; 0,48: é a radiação fotossinteticamente ativa (PAR); ϵ : o termo de eficiência, uma função dos componentes e 1, que representa a eficiência fotossintética e 2, a respiração autotrófica. T_{12} : representa o dia, T_{24} : representa dia + noite.

Os valores de DMP aumentam com o início da fase de crescimento das culturas e atingem o seu pico máximo no período em que a mesma se encontra com maior biomassa e matéria seca, onde se demonstra apta à colheita. Após isso, os valores vão decrescendo, gradativamente, em direção ao período de seca, onde é encontrado o seu menor valor em uma série anual.

O acúmulo de DMP fornece estimativas da produção de matéria seca final ao longo do tempo. Porém, embora estas estimativas possam ter boa correlação com os rendimentos finais da colheita, o DMP reflete apenas a biomassa da matéria seca (VITO, 2013). Fatores de estresse como superávit ou déficit de água, falta de nutrientes na planta ou ocorrência de pragas não são diretamente considerados no cálculo DMP, que deve ser um índice interpretado apenas como indicativo de potencial de produção.

O comportamento espectro-temporal distinto dos índices de vegetação supracitados frente às culturas e suas diferenças pronunciadas de biomassa podem facilitar a discriminação de culturas agrícolas em imagens obtidas por

meio de sensores orbitais. Porém, outro aspecto é igualmente importante quando se trata de identificação de culturas agrícolas e será discutido a seguir: o aspecto temporal, visto que a agricultura é um sistema dinâmico e mutante.

3.3 Índices de vegetação aplicados às culturas agrícolas

A aplicação temporal dos índices de vegetação, antes de tudo, pode minimizar problemas inerentes à identificação de culturas e seu mapeamento, objetivos maiores deste estudo. Um grande problema reside no fato de que uma mesma cultura pode existir em diferentes talhões, em fases fenológicas distintas, o que provoca variabilidade na resposta espectral de uma mesma classe, segundo Hill e Sturm (1991). Hall e Badhwar (1987) citam outro problema, o de semelhança espectral entre diferentes culturas na fase de dossel com cobertura total do solo, em razão da largura das bandas dos atuais sensores orbitais.

Esses problemas, sim, pedem uma melhor caracterização e discriminação das culturas e podem ser minimizados, por meio de uma análise espectro-temporal, que se valha de índices de vegetação, que são capazes de captar características inerentes às culturas, pois as variações nas assinaturas espectro-temporais estão relacionadas aos ciclos fenológicos dos alvos.

Como exemplo, a assinatura da cana-de-açúcar apresenta pronunciados picos associados às fases de crescimento e às fortes depressões nos valores de NDVI durante a colheita. O mesmo não ocorre com as florestas e as pastagens, que apresentam variação de NDVI menos intensa ao longo da série, mas com valores absolutos distintos (VICENTE et al., 2012).

De acordo com Hall e Badhwar (1987), análises multitemporais permitem um melhor acompanhamento do ciclo fenológico e o dinamismo do alvo agrícola, associado a multitemporalidade dos sensores permite uma melhor caracterização das culturas.

Séries temporais de índices de vegetação têm sido utilizadas para obter informações acerca do desenvolvimento sazonal da vegetação. Stutheit (1991) aponta que o enfoque multitemporal aumenta o ganho de informação, proveniente de imagens de sensoriamento remoto, fator importante para análises de características funcionais e estruturais da vegetação.

Este ganho ocorre, especialmente, com a utilização dos índices de vegetação, que possuem importância distinta quando o assunto é investigar o comportamento da cobertura vegetal. Com o desenvolvimento tecnológico e sua crescente utilização, os índices se tornaram mais funcionais na forma de produtos compostos, que trazem consigo a importância do aspecto temporal na análise, visto que utilizam sínteses de dados de vários dias, sendo o MOD13Q1 de 16 dias e o VGT-S10 de 10 dias os mais utilizados atualmente.

Jensen (2000) cita que existem épocas do ciclo mais propícias, quando se buscam identificar diferentes tipos de vegetação ou extrair informações biofísicas da mesma com base em dados de sensoriamento remoto. Por isso, é vital ter um conhecimento aprofundado sobre os ciclos fenológicos das plantas para selecionar datas mais apropriadas para a coleta de dados.

Assim, como ressalta Rocha (2006), a abordagem espectro-temporal tem se destacado como a mais apropriada para monitorar e mapear culturas agrícolas, pois não apenas analisa várias imagens de datas sequenciais de forma independente, mas, sim, interpreta e caracteriza o comportamento dos pixels ao longo da série temporal, com ênfase em suas variações espectrais.

Bradley e Egbert (2008) citam que, além de minimizar problemas relacionados à ocorrência de nuvens e variações da qualidade atmosférica, a análise temporal permite identificar a dinâmica da vegetação em distintas épocas, abrangendo a caracterização de ciclos para acompanhar questões relacionadas à fitossanidade das culturas e às variações desses ciclos ao longo de vários anos. Citam, ainda, que tal abordagem visa interpretar e caracterizar o

comportamento dos pixels, ao longo da série temporal, com ênfase nas variações espectrais dos mesmos, o que torna possível identificar a dinâmica da vegetação em distintas escalas temporais.

Uma análise temporal de índices de vegetação auxilia na identificação da fase em que se encontra a cultura e ajuda a observar quando os períodos de seca ou estresse hídrico ocorreram durante o ciclo e como interferem. Além disso, como cita Gleriani (2004), uma análise temporal melhora a qualidade de discriminação entre diferentes classes, permitindo a identificação das culturas com base na análise gráfica da resposta espectro-temporal.

De acordo com Townsend e Walsh (2001), a abordagem multitemporal permite encontrar informações sobre as variações fenológicas da vegetação, proporcionando uma classificação de imagens mais inteligente e precisa, em função do detalhamento das características da vegetação.

Niel e McVicar (2004) afirmam que análises multitemporais podem proporcionar mais informações sobre a área plantada e o grau de desenvolvimento das culturas, elementos fundamentais para a discriminação espectral de diferentes culturas agrícolas, permitindo identificar culturas.

Sanches (2004) explica que, para obter dados de estatísticas agrícolas ou realizar estudos sobre o comportamento espectral de cultivos com o uso de dados de sensoriamento remoto, é imprescindível uma análise multitemporal. Epiphanyo (2007) corrobora esta informação ao descrever que, para o monitoramento da atividade agrícola, é preciso realizar um acompanhamento periódico, já que as culturas apresentam uma alta dinâmica temporal.

De forma geral, o aumento dos valores dos índices, quando se analisam áreas agrícolas, é em razão do início do período de crescimento vegetativo das plantas. Esse acréscimo culmina no ponto de máximo vigor vegetativo, correspondente ao fim da fase de desenvolvimento vegetativo e período de pleno vigor verde da planta. Neste ponto, inicia-se a colheita.

Em outros estudos endossa-se a importância da utilização da análise e do tratamento de séries temporais de índices de vegetação como opção para discriminar áreas agrícolas, baseando-se, essencialmente, em analisar por meio de perfis temporais e máscaras de cultivo as variações verificadas ao longo do ciclo de uma cultura em função das mudanças fenológicas e da cobertura do solo.

Epiphanyo (2007) empregou a classificação de áreas que utilizam a Superfície de Resposta Espectro-Temporal (SRET). Rizzi et al. (2009) propuseram o Crop Enhancement Index (CEI) para avaliar os valores mínimos e máximos do EVI, dentro de um calendário agrícola definido, com vistas à identificação e quantificação das áreas cultivadas.

Guo et al. (2004) identificaram culturas na China, utilizando análise discreta de Fourier e classificação não supervisionada de séries temporais NDVI do sensor SPOT VEGETATION, atestando sua capacidade de descrever o processo de mudanças no vigor vegetativo e apresentar as características distintas de diferentes tipos de vegetação.

De Bie et al. (2011) empregaram séries temporais do NDVI do SPOT VEGETATION para identificar e avaliar culturas agrícolas em diferentes escalas, na Índia, desenvolvendo um método para a identificação e descrição de zonas com diferentes tipos de cobertura vegetal e áreas agrícolas.

Formaggio et al. (2005) utilizaram imagens MODIS, para identificar áreas com cultivos agrícolas no norte do Estado de São Paulo, obtendo mapeamentos de 94,29% de precisão, nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, 84,21% com soja e 83,33% com milho.

Esquerdo, Zullo Júnior e Antunes (2011) estudaram o potencial de análise de séries temporais NDVI para o monitoramento de soja no Brasil e concluíram que o índice é bastante eficiente e apto a análises deste porte.

Wardlow, Egbert e Kastens (2007) investigaram a aplicabilidade geral de análises de séries temporais de EVI e NDVI do MODIS para identificar culturas no Kansas (EUA) e atestando o potencial de ambos para discriminar diferentes culturas agrícolas e atestar as condições da vegetação agrícola.

Fontana et al. (2000) analisaram o comportamento temporal do NDVI para identificar e avaliar a evolução das lavouras de soja no Rio Grande do Sul e no Paraná, destacando que o índice foi útil e conseguiu representar diferenças no manejo e nas condições de crescimento.

Simões, Rocha e Lamparelli (2009) analisaram a evolução temporal de NDVI/MODIS para monitorar cana-de-açúcar nas safras 2005/06, 2006/07 e 2007/08, no Paraná, por meio de máscaras de cultivo de cana-de-açúcar, perfis espectrais de NDVI médio e máximo e mapas de diferença de NDVI e concluíram que a utilização de imagens NDVI possibilita a geração de máscaras de plantios, a caracterização e monitoramento do desenvolvimento fenológico, ao longo das safras e, também, avaliações qualitativas e quantitativas dos plantios, cruciais para o manejo da cultura e planejamento de novas safras.

Visando obter a caracterização espectral da cultura do café, Rosa (2007) avaliou o comportamento do índice de vegetação NDVI, oriundo do produto MOD13Q1, para lavouras cafeeiras e observou que o NDVI apresentou relação com a fenologia e o manejo da cultura.

Souza e Rocha (2011) utilizaram composições EVI e DMP para estimar a produtividade de áreas identificadas como cana-de-açúcar nos municípios de Barretos, Frutal e Uberaba.

Jaboinski (2011) utilizou imagens de NDVI e NDWI para identificar áreas de soja e estimar seus parâmetros biofísicos, aplicáveis à modelagem do rendimento de grãos.

Vicente et al. (2012) avaliaram o mapeamento de área de cana-de-açúcar por meio de série temporal de dados do NDVI do sensor SPOT VEGETATION.

Os resultados apresentaram boa concordância com dados oficiais de área plantada.

Victoria et al. (2012) utilizaram séries temporais de NDVI do sensor MODIS para gerar máscaras anuais de áreas agrícolas e mapear culturas no Estado do Mato Grosso, validando os resultados por meio de comparações com dados oficiais de área plantada. Santos (2010) testou metodologias para mapeamento de soja baseadas em índices de vegetação do sensor MODIS.

Como explica Junges (2011), em estudos multitemporais, com imagens adquiridas ao longo do ciclo, as diferenças quanto à época de semeadura e o manejo podem servir de base para distinção dos cultivos. A distinção, baseada no comportamento temporal, diz respeito à finalidade do cultivo e não necessariamente das espécies em si.

E o fator multitemporal é cada vez mais explorado, visto que as características da vegetação evidenciadas ao longo de uma série temporal de índices de vegetação possibilitam observações importantes a respeito dos ciclos vegetativos e informações mais confiáveis sobre área, tipo de vegetação ou até mesmo tipo de trato cultural.

Estas características favorecem a identificação de culturas agrícolas, uma vez que auxiliam o acompanhamento dos ciclos fenológicos e das mudanças no uso e cobertura do solo. Como explica Adami (2010), as alterações nos valores dos índices podem indicar mudanças sazonais estruturais e fisiológicas da vegetação, que permitem estimar, por exemplo, a duração do ciclo vegetativo, os pontos de máximo e mínimo vigor vegetativo e outras características que auxiliam a identificar e distinguir uma cultura de outra.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização fisiográfica da área de estudo

O Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba compõe uma das 12 mesorregiões do Estado de Minas Gerais. Possui 7 microrregiões e 66 municípios. Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2013), a área de estudo situa-se entre as coordenadas geográficas: 17°55'12" e 20°41'30" de latitude Sul e 45°33'30" e 51°02'18" de longitude Oeste de Greenwich. Na Figura 1 mostra-se a localização da região.

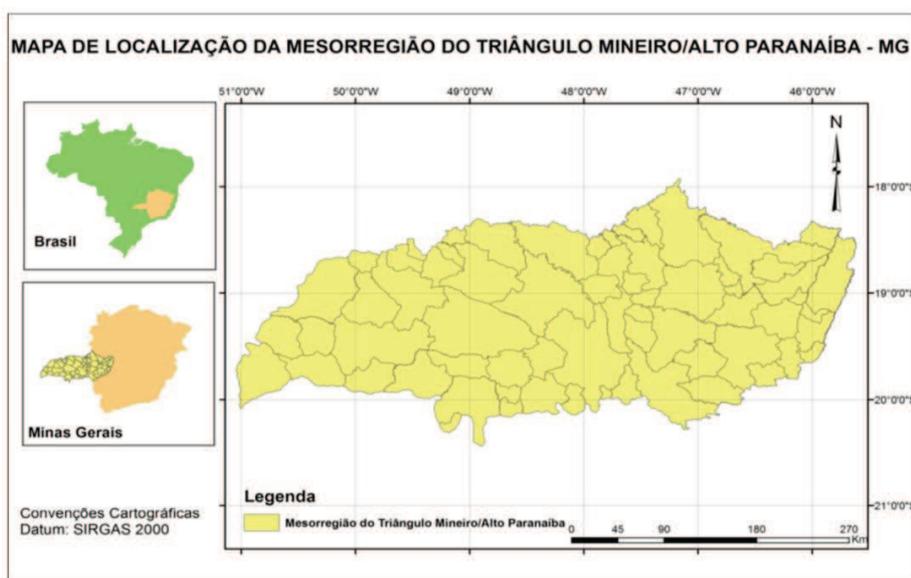


Figura 1 Mapa de localização da Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba

Fonte: Adaptado de Rocha e Novais (2012).

A mesorregião ocupa uma área de 90.545 km², equivalente a 15,4% do território mineiro. O relevo local está inserido na área denominada Chapadões

Tropicais do Brasil Central e é caracterizado por superfícies aplainadas com elevação crescente de oeste para leste. Os tipos de solo predominantes são Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Amarelo (IBGE, 2010).

O Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba está inserido no Bioma Cerrado, tendo como vegetação característica a savana, que se constitui em um extrato de gramíneas com interrupções por árvores e arbustos (SCOLFORO; CARVALHO; OLIVEIRA, 2007).

O clima na mesorregião é variado. Por ordem de extensão territorial, há ocorrência dos climas caracterizados como B1 (Úmido), B2 (Úmido), concentrando-se mais ao centro desta regional delimitando-se com as regionais do Alto São Francisco e Sul; C2 (Subúmido) em estreita faixa a nordeste desta regional e, ainda, uma pequena área do clima tipo B3 (Úmido) ao extremo sudeste desta regional e as precipitações variam entre 1.300 e 1.700 mm anuais, com temperatura média anual, variando entre 19 e 20°C (SCOLFORO; CARVALHO; OLIVEIRA, 2007).

4.2 Coleta de dados sobre os cultivos

Na Tabela 1 estão apresentados os totais de área plantada em hectare das culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho para os anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Tabela 1 Dados de área plantada das culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho para os anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba

Área plantada em hectares (ha)				
Anos	Cana-de-açúcar	Soja	Café	Milho
2009	467.258	556.195	151.034	377.816
2010	492.440	595.705	155.929	333.245
2011	523.693	581.589	152.210	354.944
2012	573.833	565.070	154.695	398.523

Fonte: IBGE (2013)

Para esta etapa, utilizou-se, prioritariamente, o banco de dados agregados intitulado Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que armazena as informações colhidas nas pesquisas realizadas pelo IBGE. O SIDRA disponibiliza informações sobre agricultura, pecuária, horticultura, extração vegetal, silvicultura, previsão de safras, comércio, indústria, construção civil, empregos, orçamento familiar, população, preços, registros civis, entre outros setores.

O SIDRA fornece informações sobre, dentre outras, a área plantada em nível mesorregional e municipal, o que permitiu a escolha de pontos específicos para a análise de dados. Tais dados institucionais foram importantes para a determinação dos pontos escolhidos para análise dos índices de vegetação das culturas e para posteriores comparações com os resultados encontrados.

Em busca de minimizar erros provocados por dúvidas sobre o uso da terra encontrado nos pontos, utilizou-se o Laboratório de Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura e Floresta - LAF, um laboratório virtual da Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE, no endereço eletrônico <<http://www.dsr.inpe.br/laf/>>.

O LAF é um portal virtual do INPE que apresenta imagens de satélite e uma ferramenta para a visualização instantânea de séries temporais de EVI-2 do MODIS. Nele, foram visualizados os pontos de cada cultura e gerados os seus perfis temporais, verificando a assinatura de cada cultura no EVI-2. Essa verificação garante maior confiabilidade acerca dos pontos das culturas.

4.3 O MOD13Q1

O produto MOD13Q1 é composto pelos índices de vegetação NDVI e EVI, por duas imagens com informações que atestam a qualidade dos produtos e reúnem informações sobre a radiometria dos pixels contidos em cada imagem (NDVI e EVI Quality); pela refletância das bandas vermelho, azul, infravermelho próximo e infravermelho médio; e por uma imagem referente ao ângulo de visada, outra referente ao ângulo zenital solar e uma última referente ao azimute.

Os produtos de vegetação MOD13Q1 são disponibilizados no endereço eletrônico do Land Processes Distributed Active Archive Center - LP DAAC (EOS/NASA): <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod13q1>, que realiza o processamento, o arquivamento e a distribuição de produtos derivados de vários sensores, entre eles o MODIS. Os produtos são disponibilizados em formato Hierarchical Data Format (HDF) e projeção sinusoidal, divididos em recortes espaciais denominados 'tiles'; cada um abrangendo uma área geográfica de 10 x 10 graus de latitude e longitude.

No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA realiza pré-processamentos que facilitam a utilização destes dados, disponibilizando imagens já prontas para uso em formato Geographic Tagged Image File Format (GeoTIFF) e reprojatadas para a base estadual brasileira, por meio do Banco de Produtos MODIS na Base Estadual Brasileira, em:

<<http://www.modis.cnptia.embrapa.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Este banco foi utilizado como fonte para a coleta dos dados de NDVI e EVI dos anos de 2009 até 2012.

Os índices NDVI e EVI do produto MOD13Q1 correspondem a uma síntese de 16 dias, possuindo resolução espacial de 250 metros x 250 metros, resultando em 23 imagens por ano.

4.4 O VGT-S10

O produto índice de vegetação VGT-S10 trata-se de uma combinação de imagens diárias com correção atmosférica. Sintetiza as dez imagens compreendidas em um período de dez dias (decêndio) em apenas uma, por meio do algoritmo Maximum Value Composite (MVC), o qual seleciona as células (pixels) com maior valor de refletância e melhor qualidade de pixel encontrada entre os valores diários ao longo de um decêndio e gera uma imagem final com a menor interferência de nuvens possível (BARTHOLOMÉ, 2013).

As imagens do produto são derivadas do processamento de bandas espectrais do sensor na região do vermelho (0,65 μm a 0,72 μm) e do infravermelho próximo (0,7 μm e 1,3 μm) do espectro eletromagnético; possuem resolução espacial de 1 km e resultam em 36 imagens decendiais ao longo de um ano.

Do produto é possível extrair informações de índices de vegetação como o NDVI, o NDWI e o DMP, nas resoluções espacial de 1 km, temporal de 10 dias e radiométrica de 8 bits. As imagens finais do produto fornecem o valor máximo calculado baseado nas imagens diárias.

O produto VGT-S10 encontra-se disponibilizado para uso no endereço eletrônico: <<http://devcicast.eu>>.

4.5 Processamento inicial dos produtos

O banco de dados utilizado para a obtenção de dados do sensor SPOT VEGETATION foi o do projeto internacional “GEONET Cast for and by developing countries – DevCoCast”(MAATHUIS et al., 2011).

As imagens obtidas foram submetidas a uma rotina de importação e organizadas em séries temporais e recortadas de acordo com o limite mesorregional do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. Este procedimento foi aplicado para as imagens de todos os índices, sendo gerada uma série temporal para cada um deles.

Na Tabela 2, pode ser vista uma síntese dos dados das séries temporais de acordo com os índices de vegetação, as datas de início e fim do período de estudo e o número total de imagens:

Tabela 2 Descrição das séries temporais dos produtos de acordo com os índices de vegetação, as datas para importação e o número de imagens geradas

Produto	Imagem inicial	Imagem final	Número total de produtos
MODISNDVI	17/01/2009	18/12/2012	90
MODIS EVI	17/01/2009	18/12/2012	90
VGT NDVI	01/01/2009	01/12/2011	106
VGTNDWI	01/04/2010	01/12/2012	97
VGT DMP	01/04/2010	01/12/2012	97

Após a organização das imagens de cada índice em forma de série temporal, foram gerados os perfis temporais e extraídos os valores dos índices de vegetação em vários momentos durante os ciclos de cada cultura, representados por estes perfis.

4.6 Geração dos perfis temporais de índices de vegetação

Os perfis caracterizadores dos cultivos foram gerados com base na determinação dos pontos de análise e na presença das camadas de referência dos dados secundários, por meio de análises da resposta espectro-temporal dos alvos pontuados. Foram efetuadas verificações de uso e cobertura dos pontos escolhidos por meio de imagens de satélite disponibilizadas no Portal LAF de Séries Temporais do INPE.

Houve preocupação especial em selecionar áreas estritamente destinadas às culturas, visando avaliar o maior número possível de pixels considerados puros na análise do comportamento dos índices, dada a resolução espacial dos produtos MOD13Q1 e VGT-S10, de 250 m e 1km, respectivamente. Essa seleção, pautada em Duveiller e Defourny (2010), procurou evitar que os valores dos índices utilizados para análise apresentassem muita mistura espectral, ou seja, contaminação visual pela presença de outros cultivos.

Diante deste cenário, foram avaliados 10 pontos de cada cultivo, perfazendo o total de 10 pixels por cultivo em cada índice de vegetação utilizado no trabalho. Na Figura 2 apresenta-se a distribuição geográfica no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba dos 40 pontos geográficos escolhidos para as análises.

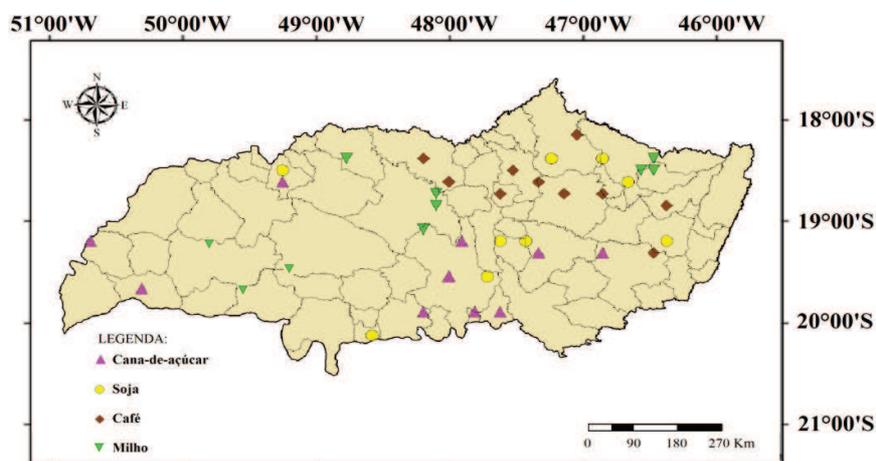


Figura 2 Mapa de localização geográfica dos pontos utilizados para as análises

Na Tabela 3 mostram-se o município, as coordenadas geográficas e a altitude em que se encontramos pontos de cana-de-açúcar apresentados na Figura 2.

Tabela 3 Localização geográfica e altitude dos pontos de cana analisados

Cultura	Município	Latitude	Longitude	Altitude
Cana	Uberaba	19°16'23.76"S	47°52'54.76"W	753 m
Cana	Uberaba	19°38'03.77"S	47°59'06.80"W	753 m
Cana	Conceição das Alagoas	19°53'40.94"S	48°09'43.78"W	513 m
Cana	Perdizes	19°26'44.30"S	47°20'35.67"W	990 m
Cana	Limeira do Oeste	19°17'43.56"S	50°45'26.07"W	434 m
Cana	Ibiá	19°22'13.97"S	46°48'05.62"W	914 m
Cana	Iturama	19°43'58.93"S	50°22'37.16"W	475 m
Cana	Delta	19°56'13.36"S	47°46'52.91"W	656 m
Cana	Conquista	19°56'05.94"S	47°38'42.08"W	686 m
Cana	Canápolis	18°49'59.89"S	49°16'35.37"W	682m

Na Tabela 4 mostram-se as coordenadas geográficas, a altitude e o município em que se encontram cada um dos pontos geográficos de soja apresentados na Figura 2.

Tabela 4 Localização geográfica e altitude dos pontos de soja analisados

Cultura	Município	Latitude	Longitude	Altitude
Soja	Planura	20°03'21.98"S	48°34'35.63"W	481 m
Soja	Planura	20°03'19.70"S	48°34'01.39"W	481 m
Soja	Uberaba	19°34'40.26"S	47°43'40.93"W	753 m
Soja	Santa Juliana	19°19'39.71"S	47°33'04.72"W	941 m
Soja	Centralina	18°35'18.40"S	49°13'57.88"W	536 m
Soja	Canápolis	18°40'05.56"S	49°17'48.44"W	682 m
Soja	Coromandel	18°38'48.34"S	46°49'39.84"W	930 m
Soja	Rio Paranaíba	19°19'24.51"S	46°16'23.50"W	1082 m
Soja	Perdizes	19°19'48.66"S	47°23'51.59"W	990 m
Soja	Patos de Minas	18°51'00.77"S	46°36'55.63"W	842 m

Na Tabela 5 mostram-se as coordenadas geográficas, a altitude e o município em que se encontram cada um dos pontos geográficos de café apresentados na Figura 2.

Tabela 5 Localização geográfica e altitude dos pontos de café analisados

Cultura	Município	Latitude	Longitude	Altitude
Café	Araguari	18°36'53.72"S	48°12'59.33"W	912 m
Café	Patrocínio	18°55'52.87"S	47°06'35.19"W	966 m
Café	Patrocínio	18°54'35.87"S	46°50'03.23"W	966 m
Café	Monte Carmelo	18°42'02.62"S	47°32'18.48"W	881 m
Café	Monte Carmelo	18°49'02.34"S	47°19'48.81"W	881 m
Café	Rio Paranaíba	19°21'57.90"S	46°21'27.43"W	1082 m
Café	Carmo do Paranaíba	18°59'47.81"S	46°20'17.19"W	1129 m
Café	Coromandel	18°24'14.53"S	46°59'12.18"W	930 m
Café	Romaria	18°54'44.52"S	47°35'20.07"W	1017 m
Café	Araguari	18°46'18.32"S	48°00'43.20"W	912 m

Na Tabela 6 mostram-se as coordenadas geográficas, a altitude e o município em que se encontram cada um dos pontos geográficos de milho apresentados na Figura 2.

Tabela 6 Localização geográfica e altitude dos pontos de milho analisados

Cultura	Município	Latitude	Longitude	Altitude
Milho	Uberaba	19°11'17.91"S	48°09'19.90"W	753 m
Milho	Patos de Minas	18°39'04.20"S	46°27'48.06"W	842 m
Milho	Lagoa Formosa	18°41'35.18"S	46°24'11.39"W	881 m
Milho	Patos de Minas	18°33'06.77"S	46°21'41.86"W	842 m
Milho	Uberlândia	19°00'20.54"S	48°04'20.99"W	844 m
Milho	Uberlândia	18°55'20.35"S	48°03'35.33"W	844 m
Milho	Tupaciguara	18°34'33.37"S	48°48'18.58"W	904 m
Milho	Itapagipe	19°43'56.20"S	49°58'01.47"W	517 m
Milho	Campina Verde	19°19'06.82"S	49°49'50.21"W	543 m
Milho	Prata	19°34'33.10"S	49°12'55.32"W	655 m

Destes pontos geográficos foram extraídos valores encontrados nas séries temporais dos índices de vegetação, sendo tabulados e analisados em planilhas eletrônicas. Foram elaborados os perfis de comportamento espectro-temporal das culturas e extraídos os dados estatísticos (média, picos máximo e mínimo e desvio padrão) que foram utilizados para a definição e a criação das máscaras de cultivo.

Optou-se por gerar perfis espectro-temporais ao longo de períodos correspondentes a duas safras, envolvendo não só as épocas de maior vigor vegetativo, mas também as de menor vigor de cada cultura, com o intuito de analisar as mudanças no vigor vegetativo de cada cultura, tendências e sazonalidades dos ciclos por meio dos perfis temporais.

4.7 Máscaras de cultivo

A geração das máscaras de cultivo levou em consideração dois fatores principais: geração de imagens representando as diferenças entre os valores máximos e mínimos, chamadas de imagens-diferença, e a aplicação de limiares de corte máximos e mínimos. Foi levado em consideração o ciclo fenológico de cada cultura analisada, com destaque para os períodos de máximo e mínimo vigor vegetativo, o que foi importante para encontrar as diferenças entre suas respostas nos índices de vegetação.

Assim, foram elaboradas as imagens anuais com os valores de máximo e de mínimo encontrados para cada cultura nos índices de vegetação empregados. A elaboração das imagens de máximo valor se deu com base em imagens dos meses de dezembro até fevereiro, período no qual ocorreram os maiores valores dos índices de vegetação.

As imagens de mínimo valor foram elaboradas com as imagens de julho até setembro, período em que as lavouras estão na transição entre o final de um

ciclo, logo após a colheita, e o processo de implantação, dado o período de semeadura, plantio e rebrota.

A subtração entre as imagens de máximo e mínimo valor dos índices de vegetação gerou uma terceira imagem para cada cultura em cada índice e em cada ano, denominada imagem-diferença.

Por apresentarem altos valores no período de safra e baixos valores no período de entressafra, as áreas destinadas a cultivos agrícolas tendem a apresentar alto contraste nos valores do índice de vegetação e isso determina que tais áreas tenham valores altos nas chamadas imagens-diferença. Essa variação diferencia áreas de cultivo de outras áreas, como pastagens e florestas, que não tendem a apresentar variações significativas na imagem-diferença, visto que seu comportamento, durante determinado período de tempo, tende a ser muito mais linear do que o de um cultivo agrícola.

Como afirmam Coutinho et al. (2012), é evidente que os períodos e os valores máximos e mínimos variam anualmente de região para região, em função de alterações na sazonalidade climática, demandando uma análise prévia e detalhada de áreas amostrais em vários pontos da região de estudo.

Nas imagens-diferença, foram aplicados valores de corte (limiares) para identificação e realce das áreas com maior variação temporal dos índices de vegetação no período (possivelmente áreas de uso agrícola), como cita Junges (2011). Estas áreas compuseram o que a comunidade científica considera como máscaras de cultivos.

Os limiares foram escolhidos, com base nos intervalos entre os valores de mínimo e máximo das culturas agrícolas nos índices de vegetação, respeitando os menores e os maiores valores encontrados pelos índices. Eles foram utilizados para a geração das máscaras de cultivo, que foram comparadas com os dados de área plantada (ha) dos cultivos de acordo com os dados oficiais do LSPA/IBGE, disponibilizados pelo SIDRA. A diferença entre as áreas

(máscaras de cultivo e dado oficial) foi expressa em termos absolutos (área em ha) e percentuais (porcentagem da área que diferiu do dado oficial).

4.8 Validação dos resultados

A metodologia aplicada visou encontrar os valores de área (em hectare) de cada um dos cultivos analisados. Desta forma, procurou-se avaliar sua precisão ao comparar os valores encontrados com os dados oficiais de área plantada.

Os resultados de área, em hectares, encontrados pela geração de máscaras de cultivo anuais de cada cultura em cada índice foram validados por meio de comparação com os dados anuais de área plantada, obtidos do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) do IBGE, conforme apresentado na Tabela 1, do item 4.2.

O confronto dos dados permitiu avaliar a concordância entre os dados em área (ha) encontrados pela metodologia aplicada e os dados estatísticos oficiais disponibilizados para a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e que são utilizados nas análises acerca da produção dos cultivos e no planejamento local de safras.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas análises dos perfis multitemporais de cada cultura no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba para diferenciar seus comportamentos e, com base nisso, identificar áreas de plantio. Para tanto, de cada data, foi extraída uma média dos 10 pontos avaliados de cada cultura. Assim, foi criada uma série temporal representando a média dos valores encontrados nos 10 pontos em cada data, para visualizar seus comportamentos na região.

Nas análises, também foram considerados os dados de precipitação na região. Como explica Monteiro (2009) gerar informações a partir de dados meteorológicos e parâmetros específicos da cultura, em geral, expressa o estado ou a resposta da mesma à condição meteorológica observada. O estado da cultura pode ser descrito de diferentes formas como, por exemplo, em relação ao seu desenvolvimento, ou seja, o estágio fenológico da cultura.

Tal estado pode ser caracterizado também em função da satisfação de suas necessidades hídricas e/ou térmicas, ou mesmo quanto ao desempenho esperado em função da radiação solar disponível. Ainda, pode informar qual o dano provável provocado pela ação de ventos intensos, geadas, granizo ou outro evento meteorológico adverso qualquer. Estas informações são consideradas de segundo grau, e neste trabalho foram expressas especificamente pela relação entre as culturas e o volume de precipitação na região durante o período estudado. Os dados de precipitação também foram obtidos do Portal LAF.

5.1 Resultados obtidos pelo índice NDVI do produto MOD13Q1

Na Figura 3 apresentam-se os resultados, obtidos por meio do índice de vegetação NDVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, mostrando o

comportamento médio das culturas nos pontos analisados e a média de precipitação na região de estudo entre agosto de 2010 e outubro de 2012.

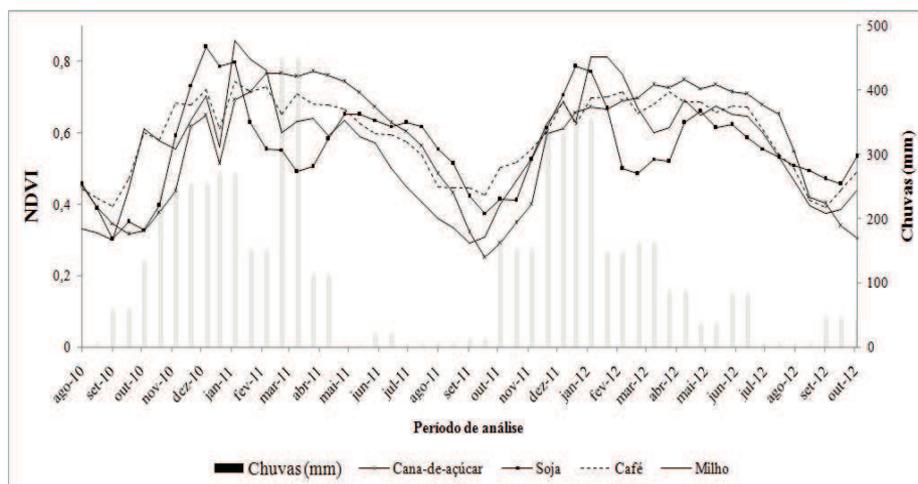


Figura 3 Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice NDVI do produto MOD13Q1, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados

Durante o intervalo de tempo analisado, os maiores valores das culturas nos índices de vegetação foram encontrados no período que compreende a chamada safra de verão (outubro a março), o que pode ser atribuído ao aumento de biomassa com o desenvolvimento das culturas, em geral, e à alta taxa de fotossíntese nas fases de floração e de enchimento dos grãos.

Em contrapartida, o período que envolve o fim da colheita e a época de plantio apresenta áreas recém-semeadas e grande presença de solo exposto. Consequentemente, ainda sem cobertura vegetal, este período marca a época na qual os valores dos índices de vegetação são menores.

Tucker (1979) cita que, após esta fase, a translocação de nutriente é maior da folha para a semente, provocando leve declínio dos valores do índice até o início do processo de maturação, onde há um rápido decaimento dos valores do índice, que indica que a cultura já deve ser colhida.

5.1.1 Cana-de-açúcar

Para a cana, a assinatura espectro-temporal mostra ciclos definidos, e pode ser diretamente relacionada à média de precipitação na região. Mesmo diante das características do ciclo da cana-de-açúcar e de ambos os índices, o comportamento espectro-temporal mostrou alta correspondência entre o aumento do vigor vegetativo e o acúmulo chuvoso na região, com gradual diminuição nos períodos secos.

Não obstante, pelos resultados da análise do MODIS NDVI mostra-se que a cultura atinge maior vigor vegetativo entre o início de fevereiro e meados de abril. Este período representa a fase do ano em que há o maior desenvolvimento da cana-de-açúcar e incremento de biomassa, o que, aliado ao incremento no regime pluviométrico, proporciona o registro de maiores valores pelos índices. Os maiores valores médios registrados foram 0,78 e 0,77 na segunda observação de março de 2011 acompanhado de alto índice de pluviosidade na região (atingindo 452,3 mm) e 0,72 na primeira observação de abril de 2012.

Após esta fase de maior vigor, entre fevereiro e abril, inicia-se a colheita, que na região vai de abril até novembro. Grande parte do período de colheita coincide com o período de seca na região, o que provoca queda abrupta nos valores dos índices.

Os menores valores anuais do MODIS NDVI para a cana foram registrados sempre nos meses de setembro e outubro, nos quais há grande

presença solo exposto e palhada, resquícios da colheita realizada. No mês de setembro foram encontrados os menores valores de 2010 (0,31) e 2011 (0,25), enquanto o menor valor de 2012 (0,33) foi registrado em outubro. Neste período, baixos índices de pluviosidade foram encontrados. Em setembro de 2010 e 2011, 63,2 e 18 mm, respectivamente, enquanto que em outubro de 2012, 40,8 mm.

Após essa fase de pico mínimo, o incremento dos valores é retomado, possivelmente, em função da rebrota e do início das chuvas, fatores que proporcionam desenvolvimento da fitomassa, dando continuidade ao ciclo da cultura. Constata-se que pelo comportamento da cana no MODIS NDVI é possível entender seu ciclo vegetativo no período analisado.

5.1.2 Soja

Segundo Faria et al. (2005), o ciclo fenológico da soja pode durar da germinação até a maturação completa e o desenvolvimento dos seus estádios fenológicos, que leva entre 90 e 200 dias, envolve diversos processos que são influenciados por variáveis ambientais como a temperatura, a duração do dia (fotoperíodo) e condições hídricas.

Em termos de resposta espectral, no período seco há uma combinação entre as respostas de palha (restos da cultura) e de solo. Isso implicou valores que se mantiveram abaixo de 0,3 no MODIS NDVI, especialmente entre junho e setembro, período de vazio sanitário e, também, no período subsequente à colheita anual e anterior ao plantio do milho safrinha (em março e abril); meses que apresentaram baixo índice pluviométrico (menos de 50 mm).

Para a soja, o período de entressafra foi considerado o período entre os meses de maio e outubro, e o período de safra o intervalo compreendido entre dezembro e março. Durante o período de análise, a estação seca ocorreu a partir

do final de março e finalizou-se em setembro, mês no qual se iniciava o período de semeadura, que ia até meados do mês seguinte.

Assim como encontrado em Rizzi e Rudorff (2007a), houve rápido incremento dos valores a partir do mês de novembro, o que demonstra a sensibilidade do NDVI ao acréscimo de fitomassa, proveniente da fase inicial do ciclo da cultura, bem como valores ainda baixos de NDVI nos meses de estabelecimento da cultura (fase que antecede o período de maior vigor vegetativo) e de senescência (que sucede o mesmo período).

O pico de maior resposta da soja nos índices de vegetação é diferente, pois este é temporalmente mais curto (menor que 30 dias) e alcançado em tempos distintos, principalmente, em razão da data de semeadura, como citam Risso et al. (2012). Os maiores valores foram registrados no período de safra de verão, mais especificamente em dezembro de 2011 e janeiro de 2012, atingindo os valores 0,78 e 0,82, respectivamente, acompanhados de índice pluviométrico satisfatório, 368,5 e 365,2 mm.

Já a queda abrupta de valores a partir de janeiro deve-se, segundo Rizzi e Rudorff (2007b), à diminuição da fitomassa da soja, o que é natural no fim de seu ciclo. Os menores valores foram registrados nos meses de setembro, sendo 0,32 em 2009, 0,30 em 2010 e 0,37 em 2011, acompanhados de baixo índice pluviométrico: 63,2 mm em setembro de 2010, 18 mm em setembro de 2011 e 39,9 mm em setembro de 2012.

5.1.3 Café

Diante dos resultados do MODIS NDVI para o café, é possível fazer associações entre os valores registrados pelos índices e as precipitações na região durante todo o ciclo de cultivo. De acordo com Matiello et al. (2002), a exigência de chuvas para os cafeeiros varia de acordo com a fase fenológica. No

período de vegetação e frutificação, o cafeeiro precisa de água disponível no solo. Já, no período de colheita e repouso, de junho a setembro, a necessidade de água é pequena e a estiagem não prejudica o manejo e, inclusive, auxilia os tratamentos culturais.

Os menores valores médios de NDVI ocorreram em meses precedidos de períodos de baixa precipitação, tais como julho, agosto e setembro, por causa do tempo de resposta da vegetação às variações do regime pluvial, que varia entre 30 e 60 dias. Este período corresponde, também, ao momento de colheita, que retira grande quantidade de folhas, provocando diminuição na resposta espectral nos índices. Com o acúmulo das chuvas, os valores de NDVI voltaram a subir.

Os menores valores médios do NDVI foram observados nas fases fenológicas II – indução e maturação das gemas florais e VI – repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários, períodos de baixa necessidade de água pela planta de café. Em 2010, o menor valor registrado foi de 0,39 na primeira observação de setembro (63,2 mm de precipitação). Em 2011, de 0,43 na segunda observação de setembro (18 mm de precipitação), e em 2012, o menor valor registrado pelo índice foi 0,39 (39,9 mm de precipitação).

Por outro lado, observaram-se altos valores de NDVI, durante as fases fenológicas de maior demanda hídrica pelos cafeeiros, as fases I - vegetação e formação de gemas florais e IV – granação dos frutos, especialmente nos meses de janeiro e fevereiro. Em 2010, foi registrado na segunda observação de dezembro (0,74), mesmo valor encontrado em 2011, na segunda observação de janeiro. Em 2012, o maior valor de NDVI foi registrado na segunda observação de fevereiro e foi de 0,71. Nestes momentos, as precipitações atingiram 286,5 mm, 289,3 mm e 165,8 mm, respectivamente.

Estes resultados vão de encontro aos encontrados por Mesquita Júnior et al. (2011), que também localizaram os menores valores de NDVI nas fases II e

IV e maiores valores nas fases I e IV da classificação realizada por Camargo e Camargo (2001), citada anteriormente. Os resultados indicam boa correlação com o período de chuva transcorrido na região.

5.1.4 Milho

Os maiores valores registrados para o milho ocorreram no período da safra de verão, com destaque para janeiro, que apresentou os maiores números em todos os anos analisados. O pico de maior vigor vegetativo assemelha-se ao de soja, abrupto e com curta duração, precedido de um período estável, com grande vigor vegetativo, coincidentemente, após o início das chuvas, em outubro. Este pico é sucedido por um período de queda nos valores em meses de pouca precipitação, o que corrobora a importância do regime pluviométrico para a cultura.

Os maiores valores anuais de NDVI foram registrados na primeira observação de fevereiro de 2010 (0,77), na segunda observação de janeiro de 2011 (0,86) e segunda observação de fevereiro de 2012 (0,81). Estes valores encontrados vão de encontro aos períodos de chuva na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, o que indica influência direta do acúmulo de precipitação dos meses anteriores, como novembro e dezembro, que apresentaram volume de precipitação variando entre 280 e 340 mm durante o período de análise.

Já, a ocorrência dos menores valores em agosto e setembro, deve-se ao fato de que são meses que representam o período imediato ao inverno, onde a vegetação está mais seca ou o solo está descoberto, resultando em menor refletância. Além, claro, de se tratar de um período entre o fim de um ciclo da cultura e início de outro. Os menores valores foram registrados na primeira observação de setembro de 2010 (0,30), 2011 (0,29) e 2011 (0,37), mês em que

o volume de precipitação foi de 63,2 mm em 2010, 18 mm em 2011 e 39,9 mm em 2012.

5.2 Resultados obtidos pelo índice EVI do produto MOD13Q1

Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos por meio do índice de vegetação EVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, mostrando o comportamento das culturas e a média de precipitação na região de estudo durante o período de análise.

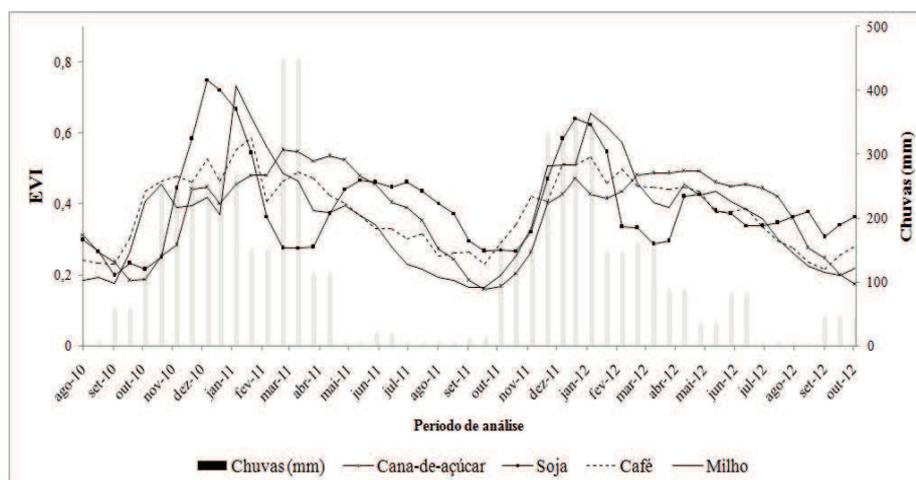


Figura 4 Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice EVI do produto MOD13Q1, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados

5.2.1 Cana-de-açúcar

Assim como no NDVI, pelos resultados da análise temporal, com base nos produtos EVI MODIS, mostra-se que os maiores valores de cana encontram-

se, invariavelmente, nos períodos de safra de verão, entre os meses de outubro e março, que apresenta o maior desenvolvimento da cultura e incremento de biomassa.

A queda dos valores se dá com o início da colheita, que na região vai de abril até novembro e, em grande parte, coincide com o período de seca na região, o que provoca queda abrupta nos valores dos índices.

Assim como no NDVI do MODIS, os menores valores anuais do EVI registrados durante o período, ocorreram sempre nos meses de setembro e outubro, nos quais há grande presença solo exposto e palhada, resquícios da colheita realizada, fatores que influenciam na resposta espectral. Os menores valores de 2010 (0,18) e 2011 (0,15) foram registrados em setembro (com precipitação atingindo 63,2 e 18, respectivamente); enquanto o menor valor de 2012 (0,17) foi encontrado no mês de outubro (com precipitação de 40,2 mm). Após essa fase, o aumento dos valores é retomado com a rebrota e o início das chuvas, que incrementam a fitomassa, dando continuidade ao ciclo da cultura.

5.2.2 Soja

Considerando que no período seco a resposta espectral da soja combina uma mistura entre as respostas de palha (restos da cultura) e de solo, foram encontrados valores que se mantiveram abaixo de 0,2 no EVI, durante o período seco (especialmente entre junho e setembro) e, também, no período subsequente à colheita e anterior ao milho safrinha (em março e abril).

A assinatura espectral mostra que o comportamento da soja no MODIS EVI foi consonante com o MODIS NDVI, mostrando boa correlação entre os dados (0,87). No item 5.3 é mostrada uma tabela com as correlações entre os índices do sensor MODIS para as culturas analisadas.

Foi possível perceber com nitidez o ciclo da soja durante o período de análise, com os períodos de crescimento vegetativo, pico de biomassa e sucessão de culturas bastante pronunciadas e visualmente identificáveis.

Risso et al. (2012) afirmam que é esperado que, durante o pico de biomassa, uma lavoura de soja em bom estado de desenvolvimento e sem problemas fitossanitários graves supere o valor de 0,8, no EVI. Valores próximos a estes foram encontrados, principalmente em dezembro de 2010, onde foi atingindo 0,76 de EVI, tendo 286,5 mm de precipitação.

O perfil temporal de comportamento da soja por meio do EVI, também, mostrou alta correspondência entre o crescimento vegetativo e o aumento da biomassa nas épocas chuvosas na região (especialmente entre outubro e março), com gradual diminuição no período de seca, onde os menores valores foram observados.

Houve rápido incremento dos valores a partir do mês de novembro, o que demonstra a sensibilidade do EVI ao acréscimo de fitomassa, proveniente da fase inicial do ciclo da cultura, bem como valores ainda baixos nos meses de estabelecimento da cultura (fase que antecede o período de maior vigor vegetativo) e de senescência (que sucede o mesmo período).

O pico de maior resposta da soja ocorreu no mesmo período e com a mesma estrutura registrada no MODIS NDVI, sendo constatada sua presença curta temporalmente (menor que 30 dias), alcançada em meses diferentes. Do mesmo modo, foi possível registrar a queda abrupta de valores a partir de janeiro, em virtude, segundo Rizzi e Rudorff (2007b) da diminuição da fitomassa com o passar do ciclo.

Assim como no NDVI, os resultados encontrados na assinatura espectral da soja do EVI vão de encontro a Adami (2010), que sinaliza que, quando o perfil temporal da soja atinge o ápice, o que é normalmente associado à fase do florescimento e início de enchimento de grãos, a planta inicia a translocação de

nutrientes para a semente, fazendo com que a derivada da curva temporal do índice torne-se negativa, iniciando o decréscimo dos valores registrados nos índices de vegetação.

5.2.3 Café

Os valores encontrados no MODIS EVI, também, possibilitam fazer associações com as precipitações na região durante o ciclo do café. De acordo com Matiello et al. (2002), no período de vegetação e frutificação, que vai de outubro a maio, o cafeeiro precisa de água disponível no solo e, no período de colheita e repouso, junho a setembro, a necessidade de água é pequena e a estiagem não prejudica o manejo.

Os menores valores médios de EVI ocorreram em meses precedidos de períodos de baixa precipitação, em decorrência do tempo de resposta da vegetação às variações do regime pluvial, que varia entre 30 e 60 dias. Baseado no acúmulo das chuvas, os valores de NDVI voltaram a subir.

Os valores de EVI mais baixos foram observados nas fases fenológicas II – indução e maturação das gemas florais e VI – repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários, períodos de baixa necessidade de água pela planta de café. Em 2010, o menor valor foi 0,23 na primeira observação de setembro. Em 2011, de 0,23 na segunda observação de setembro, e em 2012, de 0,21 também de setembro, mês que apresentou baixo índice pluviométrico (63,2 mm em 2010, 18 mm em 2011 e 39,9 mm em 2012).

Por outro lado, observaram-se valores de EVI altos durante as fases fenológicas de maior demanda hídrica pelos cafeeiros nas fases I - vegetação e formação de gemas florais e IV – granação dos frutos, especialmente nos meses de janeiro e fevereiro. Em 2010, o maior valor ocorreu na segunda observação de janeiro, sendo de 0,53. Em 2011, o maior valor foi registrado na primeira

observação de fevereiro (0,58) e, em 2012, o maior valor foi registrado na segunda observação de janeiro (0,53), o que tem relação com o alto volume de precipitação na safra de verão, variando entre 280 e 340 mm durante o período de análise.

5.2.4 Milho

É possível perceber que os maiores valores de ambos os índices ocorrem no período da safra de verão, com destaque para janeiro, que possui os maiores valores em todos os anos.

O pico de maior vigor vegetativo assemelha-se ao de soja, abrupto e com curta duração, precedido de um período estável, com grande vigor vegetativo, coincidentemente, após o início das chuvas, em outubro, e sucedido de um período de queda nos valores em meses de pouca precipitação e isso que corrobora a importância do regime pluviométrico para a cultura. Este período marca o início das fases fenológicas do milho, como a semeadura, a germinação e seu desenvolvimento inicial, como foi encontrado.

Para o EVI, os maiores valores foram registrados na segunda observação de janeiro de 2011 e 2012 (respectivamente 0,73 e 0,65). Estes valores encontrados vão de encontro com os períodos de chuva, o que indica influência direta do acúmulo de precipitação dos meses anteriores.

Já, a ocorrência dos menores valores em agosto e setembro, deve-se ao fato de que são meses que representam o período imediato ao inverno, onde a vegetação está mais seca ou o solo está descoberto, resultando em menor refletância. Além, claro, de se tratar de um período entre o fim de um ciclo da cultura e início de outro e da escassez de chuvas. Os menores valores registrados foram 0,18 e 0,16 nas primeiras observações de setembro de 2010 e 2011,

respectivamente, e 0,20 na segunda observação de setembro de 2012, com precipitações de 63,2 mm, 18 mm e 39,9 mm, respectivamente.

5.3 Comparações entre os índices NDVI e EVI do produto MOD13Q1

Pelas assinaturas temporais das culturas mostra-se que o comportamento no NDVI foi consonante com o comportamento do EVI, mostrando relação entre os dados do produto MOD13Q1, embora cada índice tenha suas próprias características. A Tabela 7 mostra a relação entre ambos os índices para as culturas analisadas.

Tabela 7 Relação entre os dados obtidos com base em imagens geradas pelos índices de vegetação NDVI e EVI do sensor MODIS para as culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no Triângulo Mineiro entre os anos de 2010 e 2012

	Cana	Soja	Café	Milho
NDVI – EVI	0,96	0,87	0,76	0,88

5.4 Resultados obtidos pelo índice NDVI do produto VGT-S10

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos por meio do índice de vegetação NDVI do produto VGT-S10 do sensor SPOT VEGETATION, mostrando a média do comportamento das culturas nos pontos coletados e a média de precipitação na região de estudo durante o período de análise.

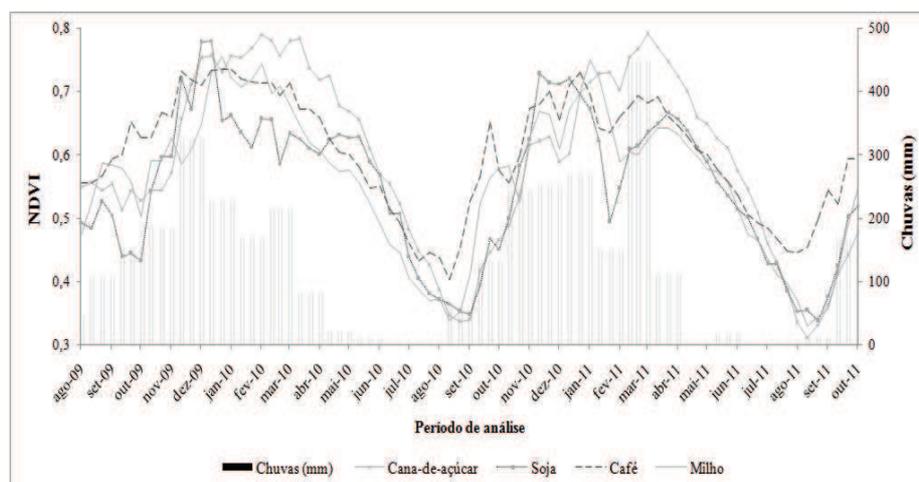


Figura 5 Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no NDVI do produto VGT-S10, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2009 e outubro de 2011 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados

5.4.1 Cana-de-açúcar

Pelos resultados da análise temporal mostra-se que os maiores valores médios de cana encontram-se, invariavelmente, nos períodos de safra de verão, entre os meses de outubro e março, que apresentam o maior desenvolvimento da cultura e incremento de biomassa. Os maiores valores encontrados foram 0,79 em fevereiro de 2010 e 0,79 em março de 2011, período de safra de verão e que prevalece o acúmulo de precipitação dos meses de novembro a fevereiro (variação entre 280 e 340 mm).

A queda dos valores se dá com o início da colheita, que reduz os valores dos índices. Assim como no MODIS NDVI, os menores valores anuais do MODIS EVI registrados, durante o período, ocorreram sempre nos meses de setembro e outubro, nos quais há grande presença solo exposto e palhada, resquícios da colheita realizada, fatores que influenciam na resposta espectral.

Os menores valores de 2009 (0,18), 2010 (0,15) e 2011 (0,17) foram registrados em setembro, onde foi observado baixo índice pluviométrico (103,6, 63,2, 18 mm, respectivamente). Após essa fase, o aumento dos valores é retomado com a rebrota e o início das chuvas, que incrementam a fitomassa, dando continuidade ao ciclo da cultura.

Uma diferença relevante no comportamento espectro-temporal ocorreu no fim de 2009, onde os menores valores médios não ficaram abaixo de 0,5 (valor mínimo de 0,51 na terceira observação de setembro), enquanto nos outros dois anos, como ocorreu na análise no MODIS, foram atingidos valores menores, como 0,34 na primeira observação de setembro de 2010 e 0,31 na terceira observação de agosto de 2011, períodos que refletem o comportamento da cultura no índice frente a pouca quantidade de chuva dos meses anteriores.

5.4.2 Soja

Os resultados de soja, encontrados na assinatura espectral dos dados do sensor SPOT VEGETATION, mostram consonância com os resultados do MODIS. O NDVI, apesar de não contemplar o ano de 2012 como o NDVI do MODIS, teve comportamento semelhante.

Os valores médios de NDVI mais baixos e mais altos foram registrados nos mesmos períodos anuais encontrados no NDVI do MODIS, que correspondem aos meses de setembro/outubro e janeiro/fevereiro, respectivamente. Os menores valores médios são encontrados no período anterior ao plantio, onde o solo encontra-se coberto pela palhada da cultura de inverno, o que torna o comportamento espectral nesta época evidentemente menor.

No fim de 2009, o menor valor médio foi registrado na segunda observação de outubro, e foi de 0,43. Em 2010, este valor foi de 0,35 na segunda

observação de setembro, e em 2011, na primeira observação de setembro, o menor valor médio foi 0,34. Uma explicação para o menor valor de 2009 ser maior do que os valores de 2010 e 2011 é o adiantado início das chuvas em relação aos outros anos, como reportam os dados do LAF.

Em 2009, o início do período chuvoso nos pontos de soja deu-se em meados de agosto, ao passo que em 2010 teve início em setembro e em 2011, menor valor entre os três, em outubro. E 2011, ano em que o início das chuvas foi mais tardio, teve o menor valor entre os anos analisados, o que comprova a relação direta entre o NDVI e a precipitação.

Após o plantio, inicia-se o processo de germinação e com isso o comportamento espectral da palhada é substituído pelo da soja, em razão do início da fase vegetativa da cultura. Na medida em que ocorre o crescimento da cultura, ocorre aumento significativo nos valores médios do NDVI até a fase reprodutiva, momento em que o índice atinge seus maiores valores.

O maior valor registrado em 2009 foi de 0,78, na terceira observação de dezembro. Em 2010, o maior valor atingido foi de 0,73, na terceira observação de novembro e em 2011 o pico vegetativo ocorreu no último da série, a primeira observação de dezembro e foi de 0,76. O registro dos picos vegetativos está diretamente relacionado ao acréscimo de precipitação, visto que foram atingidos justamente em épocas com grande acúmulo de chuvas de meses anteriores (variação entre 280 e 340 mm).

5.4.3 Café

O comportamento do café mostrou alta correlação com o período de chuvas, onde ocorre aumento de fitomassa na vegetação. O comportamento se manteve o mesmo em relação ao mesmo índice do MODIS, o que atesta correlação entre os diferentes sensores. Os menores valores médios foram

encontrados nos meses de agosto, nas fases fenológicas II – indução e maturação das gemas florais e VI – repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários. Já, os maiores valores médios nos meses de janeiro, fases fenológicas I - vegetação e formação de gemas florais e IV – granação dos frutos, que possuem maior demanda hídrica.

Em números, os valores mínimos de NDVI de cada ano foram de 0,55, na terceira observação de junho de 2009; 0,40, na terceira observação de agosto de 2010 e 0,45, na segunda observação de agosto de 2011. Os maiores foram 0,74 na segunda observação de março de 2009, 0,73 na segunda observação de janeiro de 2010 e 0,73, na primeira observação de janeiro de 2011, indicando, mais uma vez, a relação direta do índice com a precipitação.

5.4.4 Milho

Nos dados do SPOT VEGETATION, o comportamento do milho, também, foi padrão, proporcionando encontrar relação entre a assinatura temporal e as fases fenológicas.

As fases com valores mais pronunciados do índice ocorrem justamente após o período chuvoso e de semeadura, na safra de verão, e os menores na fase após a colheita, com queda abrupta em agosto e setembro, onde são registrados os valores mínimos.

Os maiores valores foram encontrados nos meses de janeiro e fevereiro, sendo 0,75 na primeira observação de janeiro de 2010, 0,74 na segunda observação de fevereiro do mesmo ano e 0,75 na primeira observação de fevereiro de 2011. Os níveis de precipitação neste período variaram próximos de 250,3 mm.

Já, os menores foram sempre encontrados nos meses de agosto, que representa a época de senescência total do cultivo, sendo de 0,34 em 2010 e 0,33

em 2011, onde foram registrados os menores índices pluviométricos 8,2 mm e 6,2 mm.

5.5 Resultados obtidos pelo índice NDWI do produto VGT-S10

Na Figura 6 apresentam-se os resultados obtidos, por meio do índice de vegetação NDWI do produto VGT-S10 do sensor SPOT VEGETATION, mostrando a média do comportamento das culturas e a média de precipitação nos pontos coletados durante o período de análise.

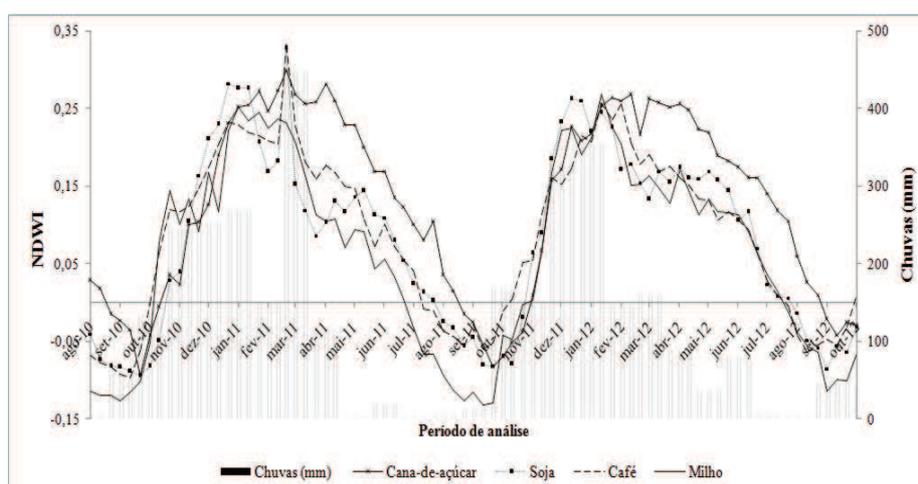


Figura 6 Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice NDWI do produto VGT-S10, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados

Analisando os resultados do índice NDWI, nota-se uma ligação entre o comportamento da cana-de-açúcar e o calendário agrícola, além da relação da cultura com os períodos chuvosos e secos. Os períodos do ciclo com maior demanda hídrica, subsequentes aos períodos chuvosos, tiveram maiores valores

na escala do índice NDWI, que, segundo Gao (1996), está diretamente relacionado ao conteúdo de água na vegetação, sendo correlacionado com o conteúdo de água do dossel vegetal, indicando mudanças na biomassa e valores oscilantes de umidade nas plantas.

5.5.1 Cana-de-açúcar

O comportamento da cana mostra que, durante o período estudado, outubro foi o mês em que a cana-de-açúcar apresentou os menores valores dentro da série temporal. Conforme citam Oliveira et al. (2010), valores negativos do índice NDWI representam que a vegetação encontra-se bastante seca. E, de fato, neste período do ano, há um cenário com mistura de palhada e solo exposto na região, por causa da realização da colheita, além da pouca retenção de água por parte do solo em função das poucas chuvas. Essa escassez hídrica faz com que os valores sejam baixos, visto que o NDWI está relacionado com a quantidade de água na vegetação. Nos meses anteriores, (agosto e setembro) foram registrados os menores índices de pluviosidade, 8,2 mm e 6,2 mm para agosto e 18 mm para setembro.

Em contrapartida, fica evidenciado que os maiores valores do índice são encontrados entre dezembro e abril, época subsequente aos tratos iniciais, caracterizada por altos níveis de precipitação, que culmina com maior biomassa e maior vigor vegetativo da cana; respeitando dois fatores: o seu calendário agrícola, que tem nestes meses o estágio de maior desenvolvimento da cultura e o tempo de resposta da vegetação à precipitação. O aumento de vigor vegetativo é grande neste período, considerado o período de safra de verão e as chuvas, que variaram entre 280 e 340 mm.

É possível verificar que o tempo de resposta da cana à vegetação é gradativo, naturalmente aumentando conforme a planta retém mais água das

chuvas, atingindo os picos de máxima 0,30 na primeira observação de março de 2011 e 0,27 na terceira observação de fevereiro de 2012; e diminuindo, quando se inicia o período de seca, atingindo os menores valores justamente no final do período de seca, que é quando a vegetação acusa os meses nos quais não houve precipitação relevante. Nesse período, os menores valores foram -0,09 e -0,08. Ambos, no primeiro decêndio de outubro, em 2010 e 2011, respectivamente.

5.5.2 Soja

Os resultados de NDWI relacionam o comportamento da cultura ao conteúdo de água do dossel vegetal. O comportamento da soja no NDWI apresenta valores maiores do que os registrados nas outras culturas, além de apresentar menores efeitos negativos decorrentes do estresse hídrico. Vale citar que a soja é um cultivo reconhecido como muito tolerante à seca, em comparação a outras culturas de verão.

Segundo Pitol e Broch (2010), a tolerância da soja à seca (déficit hídrico) é consequência de vários fatores bióticos e abióticos que conferem à lavoura determinado nível de resistência ao déficit de umidade do solo, seja por ocorrência de veranicos ou de estiagens, apresenta maior concentração de água nas folhas do que as outras culturas analisadas.

Pelos resultados mostra-se que as etapas mais críticas, para a cultura da soja em relação à disponibilidade hídrica, são as de germinação e pós-florescimento, como encontrado por Santos (2010), que observa algumas ações relacionadas ao manejo que são realizadas para minimizar os efeitos da deficiência hídrica, como a escolha criteriosa da cultivar, o plantio direto, a irrigação, o uso de quebra-ventos e um espaçamento menor entre linhas, além da realização da semeadura em épocas indicadas por estudos de zoneamento agroclimático.

Os valores mais pronunciados do NDWI foram registrados nos meses de março de 2010 (0,33, na primeira observação), dezembro (0,21, na segunda observação) e em dezembro de 2012 (0,23, na primeira observação), indicando forte correlação com o acúmulo de chuvas, que variou entre 280 e 340 mm neste período.

Já, os menores valores foram encontrados em outubro de 2010 (-0,09, na primeira observação), outubro de 2011 (-0,08, também, na primeira observação) e setembro de 2012 (-0,08, na segunda observação mensal), meses nos quais já se observa acréscimo de chuvas, mas subsequentes a períodos longos de escassez entre junho e agosto, onde a pluviosidade é mínima.

5.5.3 Café

O comportamento do NDWI reflete as condições hídricas do café na região, com base nos pontos coletados. É possível notar um aumento significativo de valores entre novembro e março, período que coincide com o da fase chuvosa na região e com as fases de maior demanda hídrica da planta, período de vegetação e frutificação. Este aumento acontece, invariavelmente, até o mês de março.

A partir desse mês, os valores caem até atingir números negativos nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, período que coincide com a época de colheita e repouso, e onde a necessidade de água é pequena e a estiagem não é tão prejudicial.

Os maiores valores foram registrados em janeiro de 2011 (0,28), março de 2011 (0,33 – maior valor da série) e em janeiro de 2012 (0,26) sempre na primeira observação mensal.

Nesse período de queda e valores negativos no NDWI, o café passa pelas fases fenológicas II – indução e maturação das gemas florais e VI –

repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários, de acordo com esquematização proposta por Camargo e Camargo (2001), não sendo afetado pela escassez de água.

5.5.4 Milho

Sobre a influência das chuvas no cultivo de milho, é possível fazer uma relação com os números encontrados por Alves et al. (2011), que observaram uma estreita relação entre o volume precipitado e o rendimento da cultura do milho cultivada em regime de sequeiro na região e Janaúba/MG.

Para Junges, Fontana e Pinto (2013), o decréscimo dos valores no NDWI para avaliar o milho pode ser atribuído ao processo de translocação de fotoassimilados aos grãos e à senescência das plantas, que ocorrem considerando o florescimento e o início do enchimento de grãos.

O milho depende muito da água para o seu desenvolvimento completo. Pelo comportamento do milho no índice NDWI, que mede a quantidade de água presente na folha, é possível constatar que o aumento dos valores do índice ocorre em consonância com o aumento das chuvas, culminando nos meses de janeiro, onde são encontrados os picos de valor máximo da cultura, que foram de 0,25 e 0,27, na segunda observação de janeiro de 2011 e na terceira observação de janeiro de 2012, respectivamente.

Como verificam Alves et al. (2011), a escolha da época de semeadura é importante para mitigar os efeitos do estresse hídrico na cultura do milho em regime de sequeiro. E os resultados comprovam que a data de semeadura foi bem escolhida, visto o crescimento do vigor vegetativo em consonância com o período chuvoso.

A demanda hídrica não afetou o desenvolvimento do milho no período de análise, pois o regime pluviométrico foi satisfatório e capaz de cobri-la. No

período de seca, os valores médios negativos foram encontrados entre os meses de junho e outubro de 2010, julho e outubro de 2011 e agosto e novembro de 2012, sendo os mínimos valores (-0,1, -0,07 e -0,04) encontrados, respectivamente, na primeira observação de outubro de 2010, 2011 e na terceira observação de 2012.

Essas datas coincidem com a época de semeadura da cultura, onde ainda não há vegetação e, conseqüentemente, refletância das plantas, o que ocasionam os valores negativos de NDWI.

5.6 Resultados obtidos pelo índice DMP do produto VGT-S10

Na Figura 7 apresentam-se os resultados obtidos, por meio do índice de vegetação DMP do produto VGT-S10 do sensor SPOT VEGETATION, mostrando a média do comportamento das culturas e a média de precipitação nos pontos coletados durante o período de análise.

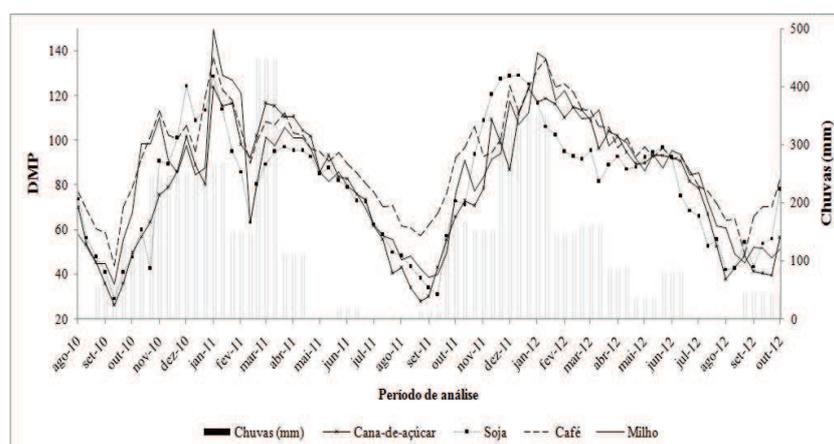


Figura 7 Perfis temporais das culturas agrícolas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no índice DMP do produto VGT-S10, referentes à média dos 10 pontos de cada cultura durante o período entre agosto de 2010 e outubro de 2012 e precipitação média dos 10 locais utilizados para a coleta dos dados

5.6.1 Cana-de-açúcar

Inicialmente, é possível notar que, em relação aos outros índices, o comportamento da assinatura temporal da cana é mantido no DMP, porém apresentando maior duração no período, considerado de maior biomassa, que corresponde ao período de safra de verão.

Essa manutenção do padrão espectral do ciclo vegetativo na análise gráfica da resposta espectro-temporal da cana-de-açúcar no índice DMP, em comparação aos outros índices, demonstra o bom padrão de correlação entre os dados dos diferentes índices. O incremento de matéria seca no período de safra de verão é grande e bem definido, durante período de análise, o que corrobora os resultados encontrados nos outros índices.

Além disso, é explícita a relação direta entre o incremento dos valores no índice e o acúmulo de precipitação, principalmente, nos meses de janeiro e fevereiro, quando a cana já se encontra mais desenvolvida, rica em nutrientes e produz maior biomassa.

A partir do início do período chuvoso, os valores começam a aumentar de forma gradativa, atingindo os picos de máxima sempre nas primeiras observações do mês de janeiro (123,9 Kg/MS/ha/dia em 2011 e 123 Kg/MS/ha/dia em 2012). O inverso acontece com o decréscimo da pluviosidade, que vai culminar em valores mínimos entre agosto e setembro, fim do período seco, como 26 na terceira observação de setembro de 2011, 27,6 na primeira observação de setembro de 2012 e 37,8 na segunda observação de agosto de 2012.

5.6.2 Soja

Para a soja, pelos resultados mostram-se dados diretamente relacionados ao comportamento vegetativo e a produção de matéria seca. A assinatura no DMP seguiu o comportamento temporal da soja encontrado nos outros índices, durante o período, respeitando o ciclo, o que mostra boa correlação entre os dados.

Os maiores valores do DMP foram encontrados, durante a safra de verão, entre os meses de dezembro e janeiro, e os menores foram registrados sempre em setembro, onde há mais solo exposto e restos culturais.

Em 2011, foram registrados os dois maiores valores máximos da série de DMP. Na segunda observação de janeiro, o valor registrado em Kg/MS/ha/dia foi de 128,7 e na terceira observação de dezembro, foi registrado o montante de 129,1. Os menores valores foram registrados sempre em setembro, na terceira observação em 2010 (29,2) e 2011 (30,7) e na segunda observação em 2012 (43,4) mês que indica o fechamento do período de seca, mas que exibe a resposta da vegetação aos meses de escassez, como citado anteriormente.

Também é possível notar a sucessão de culturas no gráfico da série temporal de DMP, com o milho safrinha aparecendo após o decréscimo e a colheita da soja, elevando os valores que representam o cultivo, o que demonstra a correlação entre os dados dos índices.

5.6.3 Café

Com os resultados mostra-se relação direta entre os valores encontrados no índice, indicadores da produção de matéria seca, com a precipitação. O gráfico da série temporal com os valores de DMP seguiu o comportamento

temporal do café, durante o período de análise, o que mostra boa correlação entre os diferentes tipos de dados.

Os maiores valores do DMP foram encontrados, durante a safra de verão, entre os meses de dezembro e janeiro, e os menores foram registrados sempre em setembro, onde há mais solo exposto e restos culturais.

Pelos resultados do índice DMP do café, assim como das outras culturas, mostra-se que os dados representativos da produção de matéria seca estão diretamente relacionados à precipitação. Os maiores valores do DMP foram encontrados, durante a safra de verão, entre os meses de dezembro e janeiro, e os menores foram registrados sempre em setembro, onde há mais solo exposto e restos culturais, além de pouca chuva.

Em 2011, o maior valor em Kg/MS/ha/dia foi registrado na segunda observação de janeiro, atingindo 137. Na segunda observação de janeiro, o maior valor de 2012 foi registrado, sendo de 136Kg/MS/ha/dia. As precipitações variaram entre 280 e 340 mm neste período. Os menores valores foram registrados sempre em setembro, mês que indica o fechamento do período de seca, mas que exibe a resposta da vegetação aos meses de escassez; na terceira observação em 2010 (43,6) e na segunda observação em 2011 (57,1) e 2012 (49,1). As precipitações neste período foram de 103,6, 63,2 e 18 mm, respectivamente).

5.6.4 Milho

Com relação aos valores encontrados no índice DMP, a resposta foi semelhante à encontrada nos outros índices do produto VGT-S10, considerando o ciclo fenológico do milho e o regime pluviométrico dos municípios de onde os pontos foram coletados.

Como encontrado nos outros cultivos, os maiores valores de DMP foram encontrados nos meses de janeiro e fevereiro, época de maior vigor vegetativo. Já, os menores valores foram encontrados em setembro, período de início de um ciclo, onde a vegetação está no início da fase de crescimento e encontra-se com baixo vigor vegetativo.

Os maiores valores em Kg/MS/ha/dia encontrados pelo índice DMP foram registrados nas segundas observações de janeiro de 2011 e 2012, sendo eles 149,2 e 139,1, respectivamente. Os menores valores foram registrados sempre em setembro, na terceira observação de 2009 (35,7), na segunda de 2010 (38,5) e na primeira de 2011 (44,8).

5.7 Comparações entre os índices NDVI, NDWI e DMP do produto VGT-S10

Os resultados referentes aos quatro cultivos mostram relação considerável entre os índices de vegetação utilizados, o que indica correlação entre os dados e complementaridade entre os índices do produto VGT-S10. Pode-se assegurar que, para o período estudado, ocorreram valores de pluviosidade favoráveis ao desenvolvimento, manejo e colheita na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Na Tabela 8 mostram-se as relações entre os índices do sensor SPOT VEGETATION para os cultivos.

Tabela 8 Relação entre os dados obtidos com base em imagens do sensor SPOT VEGETATION para as culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no Triângulo Mineiro entre os anos de 2010 e 2012

	Cana	Soja	Café	Milho
NDVI – DMP	0,83	0,65	0,67	0,65
NDVI – NDWI	0,72	0,45	0,75	0,70
DMP – NDWI	0,73	0,65	0,78	0,79

5.8 Máscaras de cultivo

A geração das máscaras de cultivo considerou a geração de imagens-diferença, e a aplicação de limiares de corte máximos e mínimos. Foi levado em consideração o ciclo fenológico de cada cultura analisada, com destaque para os períodos de máximo e mínimo vigor vegetativo.

5.8.1 Máscaras de cultivo de cana-de-açúcar

Para a geração das máscaras de cultivo de cana-de-açúcar nos índices de vegetação, primeiramente foram definidas as imagens-diferença em cada um deles. Nas imagens-diferença foram aplicados os limiares para a geração das máscaras. Desta forma, as imagens-diferença para a cana-de-açúcar foram definidas com base nas imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para a cana-de-açúcar em cada índice de vegetação

Cultura	Imagens de máximo e mínimo			
Cana	2009	2010	2011	2012
NDVI max	06/03 e 07/04	06/03 e 22/03	18/02 e 06/03	21/03 e 22/04
NDVI min	14/09 e 30/09	30/09 e 16/10	30/09 e 16/10	15/10 e 31/10
EVI max	18/02 e 06/03	18/02 e 22/03	06/03 e 22/03	22/04 e 08/05
EVI min	14/09 e 30/09	30/09 e 16/10	30/09 e 16/10	29/09 e 15/10
NDVI max	11/02 e 01/03	11/02 e 11/03	11/03 e 11/04	-
NDVI min	21/09 e 01/10	01/09 e 11/09	11/08 e 21/08	-
NDWI max	-	11/04 e 21/04	21/02 e 01/03	01/01 e 21/02
NDWI min	-	01/10 e 21/10	01/10 e 11/10	11/07 e 21/07
DMP max	-	01/04 e 11/04	11/01 e 01/02	01/01 e 21/01
DMP min	-	11/09 e 21/09	21/08 e 01/09	21/09 e 01/10

Considerando as imagens-diferença geradas, as máscaras de cultivo de cana-de-açúcar foram efetuadas com base nos limiares apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de cana-de-açúcar

	Cana de açúcar				
	MO13Q1		VGT-S10		
	NDVI	EVI	NDVI	NDWI	DMP
	2010				
Máximo	0,78	0,58	0,78	0,26	118,31
Mínimo	0,31	0,18	0,33	-0,09	26,02
	2011				
Máximo	0,76	0,55	0,79	0,29	123,89
Mínimo	0,25	0,15	0,31	0,08	27,62
	2012				
Máximo	0,74	0,49	-	0,26	122,92
Mínimo	0,33	0,17	-	0,04	37,78

Com base nestes limiares apresentados na Tabela 10, foram geradas as máscaras de cultivo para a cana-de-açúcar em cada índice de vegetação. Os resultados das máscaras em hectares foram comparados com os dados do IBGE, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 Valores de área em hectare de cana-de-açúcar, de acordo com o dado oficial do IBGE e com os resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais ocasionados*

	2009 (ha)	Erro (%)	2010 (ha)	Erro (%)	2011 (ha)	Erro (%)	2012 (ha)	Erro (%)
IBGE	467.258		492.440		523.693		573.833	
MODIS NDVI	-	-	496.612	1%	535.281	2,2%	576.375	0,4%
MODIS EVI	-	-	482.550	2%	539.800	3,1%	398.218	30,6%
SPOT NDVI	486.700	4%	514.500	4,5%	626.000	19,5%	-	-
SPOT NDWI	-	-	513.000	9%	560.000	7%	591.000	3%
SPOT DMP	-	-	481.300	2,3%	543.700	3,8%	635.600	10,8%

*Erro percentual = área oficial de cana-de-açúcar pelo IBGE – área delimitada pelo limiar/área oficial de cana-de-açúcar pelo IBGE x 100.

Pelos resultados mostra-se maior proximidade do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, em relação ao dado oficial do IBGE, exceto o EVI do ano de 2012, que destoou um pouco mais e obteve um erro percentual de 30,6%, considerado alto. Outros valores discrepantes foram encontrados nos resultados do SPOT NDVI de 2011 (19,5%) e SPOT DMP de 2012 (10,8%).

5.8.2 Máscaras de cultivo de soja

Do mesmo modo, para a geração das máscaras de cultivo de soja nos índices de vegetação, primeiramente foram definidas as imagens-diferença em cada um deles. Nas imagens-diferença foram aplicados os limiares para a geração das máscaras. Desta forma, as imagens-diferença para a soja foram definidas com base nas imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para a soja em cada índice de vegetação

Cultura	Imagens de máximo e mínimo			
Soja	2009	2010	2011	2012
NDVI max	02/02 e 18/02	01/01 e 17/01	01/01 e 17/01	01/01 e 17/01
NDVI min	30/09 e 16/10	14/09 e 16/10	30/09 e 01/11	13/09 e 29/09
EVI max	17/01 e 02/02	18/02 e 22/03	01/01 e 17/01	01/01 e 17/01
NDVI max	11/12 e 21/12	21/11 e 11/12	01/11 e 11/11	-
NDWI max	-	11/12 e 21/12	01/01 e 11/01	01/01 e 21/01
NDWI min	-	21/09 e 01/10	21/09 e 01/10	11/07 e 21/07
DMP max	-	11/12 e 21/12	01/12 e 11/12	01/01 e 11/01
DMP min	-	21/09 e 01/10	01/09 e 21/09	01/08 e 21/08

As máscaras de cultivo de cana-de-açúcar foram criadas com base nos limiares apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de soja

Soja					
	MOD13Q1		VGT-S10		
	NDVI	EVI	NDVI	NDWI	DMP
2010					
Máximo	0,84	0,75	0,72	0,23	124,44
Mínimo	0,3	0,19	0,34	-0,09	29,19
2011					
Máximo	0,78	0,72	0,76	0,32	129,14
Mínimo	0,37	0,26	0,33	-0,08	30,71
2012					
Máximo	0,81	0,65	-	0,26	125,2
Mínimo	0,45	0,28	-	-0,08	42,2

Com base nestes limiares, foram geradas as máscaras de cultivo para a soja. Os valores de área (ha) obtidos pelo método são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Valores de área em hectare de soja no dado oficial do IBGE e nos resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais ocasionados*

	2009	Erro	2010	Erro	2011	Erro	2012	Erro
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
IBGE	556.195		595.705		581.589		565.070	
MODIS NDVI	-	-	601.187	0,9%	468.556	19,4%	571.568	1,1%
MODIS EVI	-	-	673.562	13%	649.093	11,6%	602.435	6,6%
SPOT NDVI	515.800	7,3%	485.800	18,4%	237.000	59%	-	-
SPOT NDWI	-	-	579.200	2,8%	301.800	48%	486.567	13%
SPOTDMP	-	-	642.000	7,7%	454.900	21%	620.300	9,7%

*Erro percentual = área oficial de soja pelo IBGE – área delimitada pelo limiar/área oficial de soja pelo IBGE x 100.

Os valores encontrados para a soja apresentaram variação que pode ser considerada significativa em relação ao dado oficial do IBGE. De todos os resultados, os mais aproximados do valor oficial foram aqueles encontrados pelo índice NDVI do produto MOD13Q1 do sensor MODIS, como em 2010 e 2012, que apresentaram menor erro percentual (0,92 e 1,14%).

Com relação aos resultados encontrados por meio sensor SPOT VEGETATION, as variações bruscas como no NDVI, NDWI e DMP de 2011 (59, 48 e 21%, respectivamente) indicaram dificuldade pontual no mapeamento de soja pelo SPOT VEGETATION para este ano e subestimaram as estimativas do IBGE. Para o restante dos resultados, os resultados foram mais próximos do dado oficial.

5.8.3 Máscaras de cultivo de café

Para a geração das máscaras de cultivo de café, primeiramente foram definidas as imagens-diferença em cada um deles. Nas imagens-diferença foram aplicados os limiares para a geração das máscaras. Desta forma, as imagens-diferença para o café foram definidas com base nas imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para o café em cada índice de vegetação

Cultura	Imagens de máximo e mínimo			
Café	2009	2010	2011	2012
NDVI max	02/02 e 18/02	17/01 e 02/02	17/01 e 18/02	02/02 e 18/02
NDVI min	13/08 e 29/08	29/08 e 14/09	29/08 e 30/09	28/08 e 13/09
EVI max	17/01 e 02/02	01/01 e 17/01	17/01 e 02/02	01/01 e 17/01
EVI min	13/08 e 29/08	29/08 e 14/09	13/08 e 29/08	28/08 e 13/09
NDVI max	21/02 e 01/03	01/01 e 21/01	11/03 e 21/03	-
NDVI min	01/08 e 11/08	11/08 e 21/08	11/08 e 21/08	-
NDWI max	-	01/04 e 11/04	01/01 e 11/01	21/01 e 01/02
NDWI min	-	11/09 e 21/09	21/09 e 01/10	11/07 e 21/07
DMP max	-	01/04 e 11/04	11/01 e 21/01	11/01 e 21/01
DMP min	-	11/09 e 21/09	21/08 e 01/09	11/08 e 01/09

As máscaras de cultivo de café foram efetuadas com base nos limiares apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de café

	Café				
	MOD13Q1		VGT-S10		
	NDVI	EVI	NDVI	NDWI	DMP
	2010				
Máximo	0,74	0,52	0,73	0,2	121,09
Mínimo	0,39	0,22	0,4	-0,09	43,62
	2011				
Máximo	0,74	0,58	0,73	0,33	136,98
Mínimo	0,42	0,23	0,44	-0,06	57,08
	2012				
Máximo	0,71	0,53	-	0,25	135,9
Mínimo	0,39	0,21	-	-0,06	49,12

Erro percentual = área oficial de café pelo IBGE – área delimitada pelo limiar / área oficial de café pelo IBGE x 100.

Considerando estes limiares, foram geradas as máscaras de cultivo para o café. Os valores estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 Valores de área em hectare de café no dado oficial do IBGE e nos resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais ocasionados*

	2009 (ha)	Erro (%)	2010 (ha)	Erro (%)	2011 (ha)	Erro (%)	2012 (ha)	Erro (%)
IBGE	151.034		155.929		152.210		154.695	
MODIS NDVI	-	-	160.781	3,1%	156.612	2,9%	157.287	1,7%
MODIS EVI	-	-	182.056	16,7%	170.987	12,3%	175.520	13,5%
SPOT NDVI	89.900	40%	346.600	122%	101.000	33,6%	-	-
SPOT NDWI	-	-	141.200	9,4%	117.500	22,8%	35.600	77%
SPOT DMP	-	-	139.300	10,6%	179.900	18,1%	207.000	34%

*Erro percentual = área oficial de soja pelo IBGE – área delimitada pelo limiar/área oficial de soja pelo IBGE x 100.

Os valores encontrados para o café mantiveram o panorama visto na soja e apresentaram variação que pode ser considerada significativa em relação ao dado oficial do IBGE. Pelos resultados mostra-se que o MODIS apresentou números mais próximos do valor oficial, como os resultados de NDVI, que apresentou como maior erro percentual o valor 3,1%, muito baixo.

Com relação aos resultados encontrados pelo sensor SPOT VEGETATION, variações bruscas foram encontradas no NDVI: diferenças de 40%, 122% e 33,6% nos anos de 2009, 2010 e 2011, respectivamente. Isso mostra que a utilização do NDVI do produto VGT-S10, apesar de sua qualidade, não foi eficaz para a identificação de café nas condições apresentadas.

Para o NDWI e o DMP, na Tabela 17 mostra-se uma variação de 77% e 33,8% no ano de 2011, mas também bons resultados, como 9,4% de variação para o NDWI e 10,6% de variação do DMP no ano de 2010. Com os resultados indica-se dificuldade pontual no mapeamento de café com estes produtos para este ano. Para o restante do conjunto de dados, os resultados foram satisfatórios.

5.8.4 Máscaras de cultivo de milho

Para a geração das máscaras de cultivo de milho nos índices de vegetação, primeiramente foram definidas as imagens-diferença em cada um deles. Nas imagens-diferença foram aplicados os limiares para a geração das máscaras. Desta forma, as imagens-diferença para o milho foram definidas com base nas imagens de máximo e mínimo vigor apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 Imagens de máximo e mínimo vigor vegetativo usadas para gerar imagens-diferença para o milho em cada índice de vegetação

Cultura	Imagens de máximo e mínimo			
	Milho	2009	2010	2011
NDVI max	02/02 e 18/02	17/01 e 02/02	17/01 e 02/02	17/01 e 02/02
NDVI min	28/07 e 13/08	29/08 e 14/09	14/09 e 30/09	13/09 e 29/09
EVI max	17/01 e 02/02	17/01 e 18/02	17/01 e 02/02	17/01 e 02/02
EVI min	13/08 e 29/08	13/08 e 14/09	14/09 e 30/09	13/09 e 29/09
NDVI max	11/02 e 01/03	01/01 e 11/02	11/01 e 21/01	-
NDVI min	01/08 e 11/08	21/08 e 01/09	21/08 e 01/09	-
NDWI max	-	01/04 e 11/04	11/01 e 11/02	21/01 e 01/02
NDWI min	-	21/09 e 01/10	21/09 e 01/10	11/07 e 21/07
DMP max	-	01/04 e 11/04	11/01 e 21/01	11/01 e 21/01
DMP min	-	11/09 e 21/09	11/09 e 21/09	21/08 e 01/09

A geração das máscaras de cultivo de cana-de-açúcar foi efetuada com base nos limiares apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 Limiares definidos para a geração das máscaras de cultivo de milho

Milho					
	MOD13Q1		VGT-S10		
	NDVI	EVI	NDVI	NDWI	DMP
2010					
Máximo	0,77	0,62	0,75	0,16	116,86
Mínimo	0,29	0,17	0,33	-0,12	35,7
2011					
Máximo	0,85	0,73	0,74	0,25	149,23
Mínimo	0,29	0,16	0,32	-0,13	38,51
2012					
Máximo	0,81	0,65	-	0,26	139,08
Mínimo	0,37	0,19	-	-0,11	44,85

Com base nestes limiares, foram geradas as máscaras de cultivo para o milho apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 Valores de área em hectare de milho no dado oficial do IBGE e nos resultados encontrados pela metodologia de máscaras de cultivo e os erros percentuais encontrados*

	2009	Erro	2010	Erro	2011	Erro	2012	Erro
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
IBGE	377.816		333.245		354.944		398.523	
MODIS NDVI	-	-	333.487	0,07%	361.775	2%	399.175	0,2%
MODIS EVI	-	-	346.212	3%	365.312	3%	409.712	2,8%
SPOT NDVI	89.900	76%	65.900	80%	147.400	58%	-	-
SPOT NDWI	-	-	101.400	69%	148.000	58%	187.900	52%
SPOT DMP	-	-	343.000	2,9%	464.600	30,9%	382.400	4%

*Erro percentual = área oficial de milho pelo IBGE – área delimitada pelo limiar/área oficial de milho pelo IBGE x 100.

Pelos valores encontrados para o milho apresentaram-se comportamentos diferentes nos 2 sensores/produtos. Nos resultados encontrados pelo MOD13Q1, a maior variação relação ao dado oficial do IBGE foi de 3%. Nos resultados encontrados pelo sensor VGT-S10 foram, à exceção do DMP dos anos de 2010 (2,9%) e 2012 (4%), as variações foram mais bruscas, chegando a 80% no resultado do NDVI do ano de 2010.

Em geral, essa discrepância pode ser explicada pelo tamanho do pixel e pela extensão das áreas de cultivo de milho, visto que a área imageada é mais extensa do que a maioria das propriedades rurais e isso dificulta a discriminação de usos. A resolução espacial de 1km x 1km indicou uma dificuldade pontual e não favoreceu o mapeamento do milho no caso deste trabalho.

O planejamento agrícola diz respeito às ações a serem realizadas antes do estabelecimento da cultura, ou seja, quando o empreendimento agrícola começa a ser programado. Em função disso, o planejamento se fundamenta

basicamente nas informações do clima e de sua variabilidade interanual no local de interesse.

Dentre as informações agrometeorológicas empregadas no planejamento agrícola, o zoneamento agroclimático é a mais conhecida.

O zoneamento agroclimático é a determinação da aptidão climática das regiões de um país, estado ou município. Assim, em cada região, define-se a aptidão de cada área para o cultivo de determinada espécie de interesse agrícola, levando em consideração as exigências agroclimáticas dos cultivos e as informações macroclimáticas.

O macroclima ou clima regional é condicionado pelos fatores determinantes da macroescala ou escala geográfica, como latitude, altitude, continentalidade, massas de ar, entre outros. Visto que o macroclima não pode ser alterado pelo homem para se adequar às necessidades dos cultivos, essa informação deve ser a primeira considerada ao se planejar um empreendimento agrícola (MONTEIRO, 2009).

6 CONCLUSÕES

O acompanhamento dos plantios, a avaliação dos sistemas de produção e o monitoramento de safras são pontos estratégicos para a gestão e o desenvolvimento do agronegócio brasileiro. Diante de tais necessidades, este trabalho apresentou procedimentos metodológicos que permitiram a caracterização fenológica e a identificação de importantes cultivos como a cana-de-açúcar, o café, o milho e a soja.

A utilização dos índices foi permitida pelos procedimentos metodológicos aplicados para a redução das interferências atmosféricas presentes em séries temporais. A utilização dos valores médios dos pontos mostrou-se eficiente para a definição de uma média e para o tratamento dos ruídos e permitiu a geração das assinaturas temporais de parâmetros biofísicos dos cultivos. Utilizando o comportamento temporal médio desses índices foi possível separar as fases fenológicas dos cultivos.

A análise do comportamento espectro-temporal das culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, por meio do tratamento e análise de séries temporais de índices de vegetação, foi considerada eficaz no objetivo de discriminá-las em nível mesorregional.

Por meio da análise e da interpretação dos valores das séries, foi possível tecer considerações a respeito das fases fenológicas dos cultivos e relacionar os valores encontrados aos dados de precipitação e ao calendário agrícola da região.

Sobre as máscaras de cultivo geradas, pode-se concluir que o produto MOD13Q1 obteve resultados mais próximos ao dado oficial do IBGE do que o produto VGT-S10, apresentando, assim, maior precisão na identificação das culturas analisadas por meio de seus comportamentos espectro-temporais.

É possível inferir que a resolução espacial interferiu nestes resultados, visto que o produto MOD13Q1 apresenta uma resolução espacial de 250 x 250 metros, que cobre uma área de 6,25 ha por pixel, o que é considerado absolutamente razoável para avaliar agricultura. Uma realidade bem diferente do produto VGT-S10, em escala de 1 x 1 km com cada pixel recobrindo uma área de 100 ha, fator que facilita tanto a superestimação quanto a subestimação de área.

Considera-se, por fim, que a aplicação de máscaras de cultivo e de limiares definidores mostrou-se apta à identificação das culturas de cana-de-açúcar, soja, café e milho na região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

REFERÊNCIAS

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

ALVES, M. E. B. et al. Identificação e qualidade do efeito de fatores ambientais na produtividade da cultura do milho na região de Janaúba, MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 3, p. 188-201, 2011.

BARTHOLOMÉ, E. **VGT4Africa user manual**: EUR 22344 EN, European Communities. Disponível em: <<http://www.devcoast.eu/ViewContent.do?pageId=40>>. Acesso em: 5 out. 2013.

BRADLEY, B. A.; EGBERT, S. L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, p. 1096-1116, July 2008.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA DA SOJA. **Sobre soja**: histórico. Disponível em: <<http://www.cisoja.com.br/>>. Acesso em: 23 abr. 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira**: cana-de-açúcar, safra 2012/2013: terceiro levantamento, dezembro/2012. Brasília, 2011. 19 p. Disponível em: <http://www.novacana.com/pdf/conab_levantamento_12_2012.pdf> Acesso em: 9 dez. 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2009/2010**: terceiro levantamento, dezembro/2009. Brasília, 2009. 42 p. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/2graos_09.10.pdf>.
Acesso em: 12 dez. 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola cafeeira**: 4ª estimativa, dezembro/2012. Brasília, 2012. 16 p. Disponível em:
<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_20_16_01_51_boletimcafe_dezembro_2012.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2013.

COUTINHO, A. C. et al. Avaliação de metodologia para o mapeamento e monitoramento da agricultura brasileira. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 4., 2012, Bonito. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Informática Agropecuária; INPE, 2012. 1 CD-ROM.

DE BIE, C. A. J. M. et al. Analysis of multi-temporal SPOT NDVI images for small - scale land - use mapping. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 32, n. 21, p. 6673-6693, Nov. 2011.

DUVEILLER, G.; DEFOURNY, P. A conceptual framework to define the spatial resolution requirements for agricultural monitoring using remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 11, p. 2637-2650, July 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivares de soja**: regiões sul e central do Brasil 2010/2011. Londrina, 2010. Folder 010/2010.

EPIPHANIO, R. D. V. **Avaliação da potencialidade das imagens MODIS na estimação da área de soja no Estado do Mato Grosso**. 2007. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ANTUNES, J. F. G. Use of NDVI/AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 32, n. 13, p. 3711-3727, July 2011.

FARIA, R. A. de et al. Demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 46-50, jan./abr. 2000.

FARIA, R. T. et al. Simulação do desenvolvimento fenológico do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. **Anais...**Londrina: EMBRAPA, 2005. 1 CD-ROM.

FLEMISH INSTITUTE FOR TECHNOLOGICAL RESEARCH. **ENDELEO**: development of a remote sensing based tool to monitor natural ecosystems in Kenya: manual of data products. Disponível em: <<http://endeleo.vgt.vito.be/dataproducts.html>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 1399-1405, ago. 1998.

FONTANA, D. C. et al. A case study for crop monitoring and harvest forecast in south Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FOR ENVIRONMENT, 28., 2000, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town: ICRSE, 2000. p. 91-94.

FORMAGGIO, A. R. et al. Avaliação de dados MODIS 250m para áreas de agricultura intensa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 135-142. 1 CD-ROM.

GAO, B. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 266, n. 58, p. 257-266, Apr. 1996.

GLERIANI, J. M. **Redes neurais na classificação espectro-temporal de culturas agrícolas**. 2004. 198 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

GUO, J. K. et al. Cropland identification in inner Mongolia, China with SPOT-4 vegetation imagery. **IEEE International**, New York, v. 6, p. 3988-3991, Sept. 2004.

GUSSO, A.; FONSECA, E. L.; FONTANA, D. C. Soybean growth monitoring in southern Brazil using SPOT Vegetation and NOAA/AVHRR data. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON CROP MONITORING AND FORECASTING IN SOUTH AMERICA**, 2., 2006, Montevideo. **Proceedings.**, Montevideo: Joint Research Centre, 2006. p. 9-18.

HALL, F. G.; BADHWAR, G. D. Signature-extendable technology: global space-based crop recognition. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 25, n. 1, p. 11-27, 1987.

HILL, J.; STURM, B. Radiometric correction of multi-temporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 12, n. 7, p. 1471-1491, Apr. 1991.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1/2, p. 195-213, Nov. 2002.

HUETE, A.; JUSTICE, C. Modis vegetation index (MOD13). **Algorithm Theoretical Basis Document**, v. 3, p. 120, Apr. 1999. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/land_atbd.php>. Acesso em: 18 maio 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de recuperação automática - SIDRA**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Unidades da federação**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

JABOINSKI, F. R. **Avaliação de produtos do sensor MODIS para aplicações na estimativa de parâmetros biofísicos da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul**. 2011. 89 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

JACKSON, T. J. et al. Vegetation water content mapping using landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 4, p. 475-482, Sept. 2004.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resources perspective**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000. 544 p.

JUNGES, A. H. **Distribuição espacial e temporal do cultivo de trigo no Rio Grande do Sul e ajuste de modelo agrometeorológico-espectral para estimativa de rendimento de grãos**. 2011. 173 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C.; PINTO, D. G. Identification of croplands of winter cereals in Rio Grande do Sul State, Brazil, through unsupervised classification of Normalized Difference Vegetation Index images. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 883-895, jul./ago. 2013.

JUSTICE, C. O. et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4th ed. Madison: University of Wisconsin, 1999. 750 p.

MAATHUIS, B. et al. **Geonetcast toolbox**: installation, configuration and user guide of the GEONETCast Toolbox plug-in for ILWSI 3.7, XML. Version 1.2. Wageningen: Enschede, 2011. Disponível em: <<http://52north.org/downloads/earth-observation/geonetcast/toolbox>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006. 10 p. (Circular Técnica, 76).

MAISONGRANDE, P.; DUCHEMIN, B.; DEDIEU, G. VEGETATION/SPOT: an operational mission for the earth monitoring: presentation of new standard products. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 25, n. 1, p. 9-14, Jan. 2004.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura do café no Brasil**: novo manual de recomendações. Varginha: MAPA-Procafé, 2002. 387 p.

MESQUITA JUNIOR, C. H. et al. Comportamento do índice espectral NDVI em áreas cafeeiras de Três Pontas, MG, nos anos de 2008-2009. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 7., 2011, Araxá. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2011. 1 CD-ROM.

MONTEIRO, J.E.B.A. – **Agrometeorologia dos Cultivos**. INMET, Brasília-DF, 2009, 530p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2003. 307 p.

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

OLIVEIRA, T. H. et al. Índice de Umidade (NDWI) e análise espaço-temporal do albedo da superfície da bacia hidrográfica do rio Moxotó, PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 3, n. 2, p. 55-69, jul. 2010.

PITOL, C.; BROCH, D. L. Soja mais produtiva e tolerante à seca. In: . **Tecnologia de produção: soja e milho 2008/2009**. 5. ed. Maracaju: Fundação MS, 2010. p. 59-63. Disponível em: <<http://www.fundacaoms.org.br/page.php?88>>. Acesso em: 25 dez. 2013.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R. (Org.). **Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UNB; EMBRAPA Cerrados, 2001. p. 157-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: A. S. Vieira, 2010. 135 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 126 p.

RISSO, J. et al. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, set. 2012.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Estimativa de produtividade da soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Ed.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Bookimage, 2007a. p. 145-151.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônomico para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, jan. 2007b.

RIZZI, R. et al. Estimativa da área de soja no Mato Grosso por meio de imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 387-394.

ROCHA, J. V. **Crop monitoring in South America**. Ispra: Joint Research Centre, 2006. 1 p. (Bulletin, 7).

ROCHA, L.; NOVAIS, G. T. Mapeamento pluviométrico da mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, MG. **Geonorte**, Manaus, v. 2, n. 5, p. 1352-1363, 2012.

ROSA, V. G. C. **Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na região sul/sudoeste do Estado de Minas Gerais**. 2007. 142 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenware effect) of natural vegetation**. Greenbelt: NASA/GSFCT, 1974. 371 p.

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

SANTOS, J. S. **Metodologias para o mapeamento da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul utilizando imagens de sensor de moderada resolução espacial**. 2010. 112 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. de; OLIVEIRA, A. D. de. **ZEE - Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2007. 1 CD-ROM.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. p. 19-36.

SIMÕES, M. dos S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Variáveis espectrais orbitais, indicadoras de desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 4, p. 451-461, 2009.

SOUZA, A.; ROCHA, A. Monitoramento de cultivos agrícolas. In: MAATHUIS, B. H. P.; MANNAERTS, C. M. (Ed.). **DevCoCast manual de aplicações**. Enschede: ITC, 2011. p. 13-25.

STUTHEIT, J. Temporal GIS investigates global change. **GIS World**, Fort Collins, v. 4, n. 9, p. 68-72, 1991.

TOWNSEND, P. A.; WALSH, S. J. Remote sensing of forested wetlands: application of multitemporal and multispectral satellite imagery to determine plant community composition and structure in southeastern USA. **Plant Ecology**, Wageningen, v. 157, n. 2, p. 129-149, Dec. 2001.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 8, n. 2, p. 127-150, May 1979.

VICENTE, L. E. et al. Séries temporais de NDVI do sensor SPOT vegetation e algoritmo SAM aplicados ao mapeamento de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1337-1345, set. 2012.

VICTORIA, D. de C. et al. Cropland area estimates using Modis NDVI time series in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, set. 2012.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: an assessment for the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, p. 1096-1116, July 2008.

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

WIEGAND, C. L. et al. Vegetation density as deduced from ERTS-1MSS response. In: ERTS SIMPOSIUM, 3., 1974, Washington. **Proceedings...** Washington: ERTS, 1974. v. 1, p. 93-116.

XAVIER, A. C. et al. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 27, n. 4, p. 755-768, Feb. 2006.