



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

FELIPE CARDOSO DE OLIVEIRA MAIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

FELIPE CARDOSO DE OLIVEIRA MAIA

ORIENTADOR: TAIRONE PAIVA LEÃO

COORIENTADOR: VINICIUS BOF BUFON

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO:

BRASÍLIA/DF

FEVEREIRO/2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

FELIPE CARDOSO DE OLIVEIRA MAIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.

APROVADA POR:

TAIRONE PAIVA LEÃO, Doutor, Professor Associado da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília – UnB. E-mail: tleao@unb.br (ORIENTADOR)

MARINA R. BILICH NEUMANN, Doutora, Professora Adjunta da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – Universidade de Brasília – UnB. E-mail: marinabilich@unb.br (EXAMINADOR INTERNO)

THOMAZ ADOLPHO REIN, Doutor, Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Cerrados. E-mail: thomaz.rein@embrapa.br (EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 25 de fevereiro de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Maia, Felipe Cardoso de Oliveira

Utilização de índices de vegetação para identificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar / Felipe Cardoso de Oliveira Maia; Orientador: Tairone Paiva Leão - Brasília, 2019.

86 f.; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2019.

1. Zonas de manejo. 2. EVI. 3. NDVI

I. LEÃO, T.P. Ph. D.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MAIA, F. C. O. **Utilização de índices de vegetação para identificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2019, 86 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Cardoso de Oliveira Maia

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Utilização de índices de vegetação para identificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar.**

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.

Nome: Felipe Cardoso de Oliveira Maia

Tel: (61) 993794210 / Email: felipe2cardoso@gmail.com

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Janaína Santos e Edgar Vieira; ao meu grande amigo Humberto; a minha namorada Jéssica; aos demais familiares e aos meus orientadores, Tairone e Vinicius.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade concedida.

Aos meus pais, Janaína e Edgar, pela educação que me foi dada e sem a qual nada disso seria possível.

A minha namorada Jéssica, pela motivação e compreensão.

Ao meu grande amigo Humberto, por toda motivação e apoio durante minha jornada acadêmica.

Aos meus familiares, tios, avós e primos por todo companherismo e incentivo.

Aos meus orientadores Vinicius Bufon e Tairone Leão, pela oportunidade concedida a mim em trabalhar juntamente com eles e, antes de tudo, pela amizade, compreensão, profissionalismo e compreensão.

À professora Marina Bilich, por toda ajuda concedida no desenvolvimento desse trabalho e também pela participação na banca de qualificação.

Ao pesquisador Thomaz Rein, pela participação na banca de defesa.

Aos meus amigos de curso, pelos bons momentos desfrutados e experiências adquiridas.

À Usina Boa Vista, pela disponibilização dos dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

“Quem vence sem dificuldades,
triunfa sem glória!”
(Augusto Cury)

SUMÁRIO

CAPÍTULO GERAL	
1. INTRODUÇÃO	1
2. HIPÓTESE	2
3. OBJETIVOS	2
3.1. Objetivo Geral	2
3.2. Objetivos Específicos	3
4. REVISÃO DE LITERATURA	3
4.1. Origem da Cultura da Cana-de-Açúcar	3
4.2. O Cerrado Brasileiro e a Expansão da Agricultura	4
4.2.2. Cana-de-Açúcar e a Região Centro-Sul do Brasil	5
4.2.3. Sustentabilidade e Tecnologias Empregadas no Manejo da Cultura da Cana-de-Açúcar	7
4.2.4. Zoneamento Agroclimático e Agroecológico da Cana-de-Açúcar	9
4.3. Ambientes de Produção	10
4.3.1. Morfologia, Mineralogia e Disponibilidade Hídrica do Solo	11
4.3.2. Classes de Solo	13
4.3.3. Fatores Climáticos	16
4.3.4. Métodos de Classificação de Ambientes de Produção de Cana-de-Açúcar	17
4.4. Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura	21
4.4.1. Índices de Vegetação	22
4.4.2. Principais Aplicações do SR na Cultura da Cana-de-Açúcar	26
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO ÚNICO	
1. INTRODUÇÃO	47
2. MATERIAIS E MÉTODOS	49
2.1. Caracterização da Área de Estudo	49
2.1.1. Manejo e Coleta de Dados das Áreas de Produção	50
2.1.2. Dados Históricos da Área de Estudo	52
2.2. Organização e Processamento dos Dados	53
2.2.1. Aquisição das Imagens do Satélite Sentinel-2A	53
2.2.2. Índices de Vegetação	54
2.2.3. Atribuição dos Índices aos Ambientes de Produção	55
2.2.4. Janelas de Idade da Cultura e Períodos Climáticos Analisados	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Áreas aptas à expansão do cultivo de cana-de-açúcar na Região Centro-Oeste (Manzatto et al., 2009).....	10
Tabela 2. Áreas aptas à expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil (Manzatto et al., 2009).....	10
Tabela 3. Classes de disponibilidade de água e volume de água disponível para três níveis de evapotranspiração potencial (Prado et al., 2016).....	15
Tabela 4. Classes de disponibilidade de água para três solos da região Centro-Sul do Brasil (adaptado de Barbosa, 2017).	16
Tabela 5. Expectativa de produtividade de cana-de-açúcar (TCH – média de 4 cortes) para cada ambiente de produção (adaptado de Joaquim et al., 1997).	18
Tabela 6. Potencial de rendimento médio esperado (TCH – média de 5 cortes) para diferentes climas e ambientes de produção (adaptado de Joaquim et al., 1997; Bertolani et al., 2015)..	19
Tabela 7. Ambientes de produção de cana-de-açúcar - Ambicana (adaptado de Prado, 2016).	20
Tabela 8: Principais índices de vegetação disponíveis na literatura.....	24
Tabela 9. Data de aquisição das imagens.	55
Tabela 10. Produtividade média (TCH) de acordo com as classes de solo do banco de dados analisado.	57
Tabela 11. Produtividade média (TCH) e desvio padrão para os ambientes de produção analisados.	58
Tabela 12. Estatística descritiva do índice de vegetação NDVI para os ambientes de produção das áreas com idade entre 180 e 240 dias.....	60
Tabela 13. Média e desvio padrão do EVI2 para os períodos de idade da cultura.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produtividade média (TCH) da cultura da cana-de-açúcar de acordo com as características químicas subsuperficiais de diferentes classes de solo (Landell et al., 2013). .	15
Figura 2. Produtividade média de 4 corte para cada ambiente de produção ao longo de 12 anos (Donzelli, 2007).	18
Figura 3. Curvas de reflectância típicas da vegetação sadia (adaptado de Filho et al., 2008).	23
Figura 4. Localização das áreas de produção da Usina Boa Vista.	50
Figura 5. Bacia hidrográfica e relevo da área de estudo.....	51
Figura 6. Ambientes de produção de cana-de-açúcar da área de estudo.	51
Figura 7. Pontos de amostragem de solo nas áreas de produção da UBV.....	53
Figura 8. Resolução espacial (m) e espectral (nm) das bandas (B) do satélite Sentinel-2A (ESA, 2017).	54
Figura 9. Índices de vegetação NDVI e EVI2 para a imagem de 03/04/2016..	59
Figura 10. Média do EVI2 ao longo do tempo para cada ambiente de produção com idade entre 180 e 240 dias.	61
Figura 11. Média do EVI2 ao longo do tempo para cada ambiente de produção com idade entre 240 e 305 dias.	61
Figura 12. Média do EVI2 ao longo do tempo para cada ambiente de produção com idade entre 150 e 305 dias.	62
Figura 13. Média do EVI2 para os ambientes de produção referente às áreas com idade entre 180 e 240 dias.	64
Figura 14. Média do EVI2 para os ambientes de produção referente às áreas com idade entre 240 e 305 dias.	64
Figura 15. Média do EVI2 para os ambientes de produção referente às áreas com idade entre 150 e 305 dias.	65

UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

Historicamente, a maior parte dos cultivos de cana-de-açúcar se concentrava na região Sudeste, principalmente no bioma Mata Atlântica no estado de São Paulo. No entanto, nas últimas duas décadas, a cana-de-açúcar foi sendo rapidamente introduzida na região dos Cerrados, segundo maior bioma da América do Sul e que cobre aproximadamente 25% do país. Este bioma era considerado inadequado para a agricultura por conta dos seus solos quimicamente pobres. Contudo, devido à pesquisa e avanço tecnológico, aliado às características favoráveis à mecanização agrícola, se transformou em uma das regiões mais produtivas do país e do mundo. A compreensão das características edafoclimáticas de uma determinada região e suas interações são essenciais para definição dos ambientes de produção e adoção de estratégias de manejo. A elevada demanda de mão de obra, custo operacional e o tempo despendido na caracterização desses ambientes, atualmente realizada por meio de levantamento convencional do solo, são um grande desafio. Por isso, é imprescindível o desenvolvimento de métodos e ferramentas para caracterização do ambiente de produção da cana-de-açúcar de forma mais rápida e com menor custo operacional. Uma alternativa para substituir ou auxiliar o método convencional é a utilização do sensoriamento remoto, por meio da análise de índices de vegetação, interpretar o potencial produtivo dos ambientes. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a utilização de índices de vegetação para discriminação de ambientes de produção de cana-de-açúcar. Avaliou-se ainda a melhor idade da cultura e o período climático mais adequado para se verificar a máxima diferença na resposta dos índices de vegetação entre os ambientes de produção. O trabalho foi realizado por meio da análise dos ambientes de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista, Quirinópolis - GO. Foram utilizados dados históricos de produtividade dos anos agrícolas 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018. Para a composição dos índices de vegetação (IV) NDVI e EVI2 foram utilizadas 14 imagens do satélite Sentinel-2A. Os índices foram calculados para cada uma das imagens e o valor médio dos IV de cada talhão foram atribuídos e comparados ao ambiente de produção mapeado pela usina utilizando o método convencional. O NDVI não apresentou relação com os ambientes de produção. O EVI2 mostrou-se eficaz na distinção dos ambientes de produção. As maiores diferenças nos valores médios de índice de vegetação e, portanto, a melhor estratégia encontrada para discriminação dos ambientes de produção de cana-de-açúcar por sensoriamento remoto, é utilizar o EVI2 em canavial com idade entre 180 e 240 dias no período climático chuvoso.

Palavras-chave: Zonas de manejo, sensoriamento remoto, EVI, NDVI.

USE OF VEGETATION INDEXES FOR IDENTIFICATION ENVIRONMENTS OF PRODUCTION FOR SUGARCANE

ABSTRACT

Historically, most of the Brazilian sugarcane production was concentrated in the Southeast region, mainly on the Atlantic Forest biome in the state of São Paulo. However, in the last two decades, sugarcane production has been rapidly introduced in the Cerrado, the second largest biome in South America and covers approximately 25% of the country, including an important fraction of São Paulo state. This biome was initially considered unsuitable for agriculture due to its poor soils fertility. However, research and technological development, together with a landscape very favorable to agricultural mechanization, allowed the Cerrado biome to become one of the most productive regions of the country and the globe. The understanding of the edaphoclimatic characteristics of a given region and its interactions are essential for defining the production environment and adoption of proper management strategies. The intensive demand of time, labor and cost to characterize the production environment, currently carried out by conventional soil sampling, is a great challenge. Therefore, it is indispensable the development of methods and tools to characterize the sugarcane production environment faster and with lower operational costs. The remote sensing, through vegetation index analysis, could be an alternative to substitute or support the conventional method interpreting and the environment production potential. Thus, the objective of this study was to assess the suitability of vegetation indexes to distinguish environments of sugarcane production. It was also evaluated the most favorable crop age and weather season for maximum vegetation index differences between production environments. The work was carried analysing the sugarcane production environments of the Boa Vista Sugarmill, in the municipality of Quirinópolis - GO. Historical data from three agricultural years were used. The composition of NDVI and EVI2 vegetation indexes were calculated for 14 images of the Sentinel-2A satellite. The vegetation index for each image was than compared to the actual production environment, through a vector layer (*shapefile*) built by the sugarmill using the conventional method. The NDVI was not correlated to the production environments. The EVI2 was able to distinguish the biomass of different production environments. The greatest differences between average vegetation index values and, therefore, the best found strategy to distinguish sugarcane production environments using remote sensing was using the EVI2 for sugarcane fields with age between 180 and 240 days in the rainy season.

Keywords: Management areas, remote sensing, EVI, NDVI.

1. INTRODUÇÃO

A migração da produção da cana-de-açúcar, das regiões tradicionais do bioma Mata Atlântica no sudeste do país para o Cerrado, trouxe grande desafio ao manejo da cultura, especialmente em áreas com predominância de solos com baixa capacidade de armazenamento de água e elevado déficit hídrico, pois o clima do Cerrado brasileiro apresenta uma longa estação seca (5 a 6 meses) (RODRIGUES et al., 2016).

Por esta razão, em conjunto com a fertilidade do solo, as características de armazenamento de água do solo são elemento chave na definição de "zonas de manejo homogêneo". Estas zonas, também conhecidas na literatura como "unidades de gestão diferenciada" são denominadas, no setor sucroenergético, de "ambientes de produção" (Prado, 2016). Um dos maiores desafios na caracterização desses ambientes de produção de cana-de-açúcar está na prospecção e caracterização de extensas áreas, que atualmente são realizadas por meio de levantamento convencional do solo, elevando os custos com mão de obra especializada e análises de solo. Um problema adicional pode estar relacionado à caracterização dos ambientes em áreas de expansão, muitas vezes pouco acessíveis devido a aspectos limitantes da topografia e vegetação densa, tornando pouco precisa a caracterização dos ambientes nessas áreas (VARGA et al., 2015). Diante desse cenário, o setor produtivo agrícola tem buscado a obtenção de estimativas que sejam cada vez mais rápidas, confiáveis e que diminuam os custos de produção (ALVES et al., 2012). Dessa maneira, o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de sensoriamento remoto viabilizam a aplicação dessas ferramentas em larga escala (ANTUNES et al., 2015).

Em função da grande extensão territorial do país, a utilização das ferramentas de sensoriamento remoto tem se intensificado, principalmente aquelas cujas aplicações se dão no campo de estudo da vegetação e cobertura terrestre, impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias. Os vários componentes da superfície terrestre, tais como água, solo e vegetação podem refletir, absorver e transmitir energia eletromagnética em diferentes comprimentos de onda, que variam de acordo com as características físicas e químicas de cada alvo. Com o desenvolvimento de aplicações de sensoriamento remoto para o estudo da vegetação, diferentes índices de vegetação têm sido propostos para avaliá-las, quantitativa e qualitativamente, por meio do uso de dados multiespectrais (SIMÕES et al., 2003). Dentre os vários índices desenvolvidos, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um dos mais utilizados atualmente, uma vez que fornece estimativas de parâmetros biofísicos da

vegetação, como índice de área foliar (IAF), acúmulo de biomassa e produtividade (BÉGUÉ et al., 2010).

Outros índices também foram desenvolvidos com o objetivo de captar variações estruturais do dossel das culturas e também estimar o conteúdo de água foliar, como o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), respectivamente (JIANG et al., 2008). Tais índices têm como finalidade aumentar a sensibilidade aos parâmetros biofísicos da vegetação e também minimizar as interferências provenientes da atmosfera e do solo. Estes índices permitem evidenciar padrões da vegetação que se mostram diretamente relacionados às dinâmicas sazonais dos ambientes em que estão inseridos (MONDAL, 2011).

Visando incrementar a eficiência de uso de água para produção de cana-de-açúcar através do aprimoramento das estratégias de definição de ambientes de produção, a Embrapa Cerrados estabeleceu parceria técnico-científica com o Grupo São Martinho, uma das principais empresas do setor sucroenergético brasileiro. No projeto de parceria, a premissa básica é que diferentes ambientes de produção e, conseqüentemente, diferentes ofertas de nutrientes e água resultarão em diferentes taxas de crescimento e acúmulo de biomassa das culturas. Parte-se do pressuposto que, pelo fato dos índices de vegetação serem capazes de mensurar diferenças na produção de biomassa, também poderão ser ferramentas auxiliares na identificação desses diferentes ambientes. Para este trabalho de dissertação, firmou-se parceria entre o Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade de Brasília e a Embrapa Cerrados para, utilizando-se da base de dados disponibilizada pelo Grupo São Martinho, auxiliar no teste inicial de parte das premissas supracitadas.

2. HIPÓTESE

É possível diferenciar ambientes de produção de cana-de-açúcar com base em índices de vegetação.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Avaliar a utilização de índices de vegetação como ferramentas auxiliares na identificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar.

3.2. Objetivos Específicos

- i. Testar dois índices de vegetação na discriminação dos ambientes de produção de cana-de-açúcar;
- ii. Avaliar qual a melhor idade da cultura da cana-de-açúcar para se verificar a máxima diferença na resposta do índice de vegetação entre os ambientes de produção;
- iii. Analisar qual o período sazonal mais adequado (chuvoso, transição ou seca) para se verificar diferença entre os ambientes de produção por meio do índice de vegetação.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Origem da Cultura da Cana-de-Açúcar

Planta perene e própria de climas tropicais e subtropicais (FIGUEIREDO, 2010), a cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, abrangendo várias espécies. A grande maioria das cultivares comerciais de cana-de-açúcar cultivadas atualmente é híbrida. Nesses híbridos, procura-se aliar a rusticidade e a resistência às doenças, às boas qualidades de riqueza em açúcar das variedades nobres de *Saccharum officinarum* (CESNIK & MIOCQUE, 2004). A cultura é, atualmente, a principal fonte de açúcar do mundo, sendo responsável por aproximadamente 80% de todo o fornecimento mundial.

Vários autores divergem sobre o centro de origem da cultura da cana-de-açúcar, mas estima-se que o local mais provável seja a região Sudeste da Ásia. Segundo Miranda (2008), no ano de 1532, as primeiras mudas da cultura foram introduzidas no Brasil por Martim Afonso de Souza, na capitania de São Vicente, Estado de São Paulo, e essas eram naturais da Ilha da Madeira e da Região dos Açores, cujas condições climáticas eram semelhantes às do país Sul-Americano (CHAVES et al., 2003; PÁDUA JUNIOR, 2016). Posteriormente, por aspectos econômicos, a cultura da cana-de-açúcar se expandiu em grande escala para o estado de São Paulo, atingindo novas fronteiras, em especial no bioma Cerrado (Oeste de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) (PÁDUA JUNIOR, 2016).

No estado de Goiás, a produção de cana-de-açúcar apresenta registros de cultivos desde a década de 1930, com cerca de 1.400 engenhos e uma produção de 166 mil toneladas no ano de 1940 (BARBALHO, 2013), sendo destinada principalmente à produção de açúcar, rapadura e cachaça (SANTOS, 1987).

4.2. O Cerrado Brasileiro e a Expansão da Agricultura

O bioma Cerrado é uma savana neotropical, responsável por aproximadamente 25% da cobertura total do país e é o segundo maior bioma da América do Sul, atrás apenas da Floresta Amazônica (SANO et al., 2010; HUNKE et al., 2015; ARRUDA et al., 2016). O Cerrado ocupa uma área de aproximadamente 204,7 milhões de hectares (IBGE, 2004) na porção central do Brasil e engloba parte dos estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo, Tocantins e Distrito Federal.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o Cerrado apresenta um clima típico Aw (savana tropical úmida), com uma estação seca distinta entre maio e setembro. A precipitação e a temperatura variam com a latitude (norte-sul) e com a altitude (300-1800 m) (HUNKE et al., 2015). A precipitação média anual e as taxas de evapotranspiração (ET) na estação chuvosa são de 750 a 2000 mm e 900 a 1100 mm, respectivamente. O período entre os meses de outubro e abril é caracterizado como a estação chuvosa, que concentra aproximadamente 90% da precipitação total anual (OLIVEIRA-FILHO & RATTER, 2002). A demanda evaporativa é substancialmente maior na estação seca, e a combinação dessa maior demanda evaporativa, aliada à baixa disponibilidade de água dos solos, faz do Cerrado um ambiente potencialmente limitante e estressante para o desenvolvimento das culturas agrícolas, onde àquelas com sistema radicular menos profundo podem ter suas taxas de ET diminuídas em mais de 50% (RODRIGUES et al., 2014; RODRIGUES et al., 2016).

Os solos do Cerrado são solos tropicais, com elevado grau de intemperismo. Estes solos cobrem cerca de 65% da área total do Brasil, prevalecendo nas regiões Amazônica, Centro-Oeste e Sudeste, abrangendo grande parte das terras agrícolas (FORMOSO et al., 1999). Neste bioma, a maioria dos solos cultivados com cana-de-açúcar pertencem à classe dos Latossolos, característicos de regiões sob temperatura e índice pluviométrico altos, e com propriedades físicas adequadas à agricultura (SILVA et al., 2015). Grande parte dos solos tropicais possui carga elétrica variável, apresentando propriedades que estão ligadas direta ou indiretamente ao balanço dessas cargas na superfície das partículas que compõem seu sistema coloidal (LEÃO et al., 2013). Esses solos, em geral, apresentam boa profundidade e porosidade, estrutura estável e alta permeabilidade. No entanto, se constatarem algumas propriedades indesejáveis para a agricultura, como elevada acidez, baixa reserva de nutrientes, baixa capacidade de troca catiônica e alta capacidade de adsorção aniônica (SPOSITO et al., 2001; CRESPO-MENDES et al., 2019).

O aumento contínuo da demanda global por alimentos, energia e água tem causado mudanças diretas e indiretas no uso da terra, onde, nas últimas três décadas, a agricultura tem experimentado fortes mudanças em termos de área plantada, produtividade e economia (FAO, 2017). As pressões antrópicas sobre os recursos da vegetação, principalmente através da conversão da vegetação nativa em agricultura, têm sido o principal fator de transformação do bioma Cerrado nos últimos anos (SILVA et al., 2006). A transferência da capital brasileira do Rio de Janeiro para Brasília, na década de 1960, contribuiu significativamente para a abertura e o desenvolvimento de novas áreas no Cerrado, incentivadas pelo governo (PEREIRA et al., 2012). O Cerrado foi, por muito tempo, considerado como sendo impróprio para a agricultura por conta dos seus solos quimicamente pobres. No entanto, avanços tecnológicos, estudos agronômicos, incentivos governamentais e as características favoráveis à mecanização agrícola, aliados aos baixos preços das terras, contribuíram para transformar o Cerrado em uma região agrícola em expansão (GOEDERT, 1983; GRECCHI et al., 2014).

As instituições de pesquisa brasileira contribuíram significativamente para essa expansão e estabelecimento das culturas agrícolas nesta região, melhorando geneticamente as culturas tropicais para se adaptarem às condições edafoclimáticas do Cerrado, através de características de precocidade, tolerância à seca e às condições de acidez dos solos (LOPES et al., 2012). Com as correções químicas apropriadas, os solos do Cerrado passaram a ser altamente produtivos, e desde meados da década de 1970, grandes áreas foram incorporadas à agricultura, de tal maneira que hoje a região representa a principal área produtora de grãos do país, passando a constituir “a grande fronteira agrícola do Brasil” (SOUZA et al., 2016).

A expansão das terras agrícolas moldou a paisagem do bioma Cerrado nas últimas décadas (GRECCHI et al., 2014), onde desde os anos 1970 as culturas agrícolas se expandiram sobre áreas de pastagem e áreas de vegetação nativa (BEUCHLE et al., 2015). Essa expansão levou a um aumento significativo da produção de alimentos e riqueza econômica (HUNKE et al., 2015), onde extensos plantios de soja, milho feijão, algodão, café e cana-de-açúcar passaram a predominar em regiões como: Luís Eduardo Magalhães, BA, Jataí e Rio Verde, GO, e Lucas do Rio Verde, Sorriso e Sinop, MT (SANO et al., 2008).

4.2.2. Cana-de-Açúcar e a Região Centro-Sul do Brasil

O complexo produtivo da cana-de-açúcar apresenta dois períodos marcantes. O primeiro, 1975, baseia-se no Programa Nacional do Alcool (Proálcool), a partir do qual se incrementou o teor de etanol na gasolina, e também o emprego de veículos a etanol puro. O

segundo momento é composto pela introdução bem sucedida dos veículos com motores flex pela indústria automobilística brasileira (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA-CNI, 2012), desta forma o país é considerado pioneiro na utilização dos biocombustíveis em larga escala, estimulando, sobretudo, a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no país (FERNANDES & SANTOS, 2011).

A expansão da cana-de-açúcar se deu inicialmente sobre áreas de mata (vegetação nativa), e a partir dos anos 1990 e 2000 em áreas de pastagens (CHERUBIN, 2016), e a maior parte dos cultivos de cana-de-açúcar se concentrava na região Sudeste, especialmente sobre áreas de Mata Atlântica no estado de São Paulo. No entanto, nas últimas duas décadas, a produção de cana-de-açúcar se expandiu para a região do Cerrado, inclusive de São Paulo (FILOSO, 2015; BELLEZONI et al., 2018).

Atualmente, o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil ocupa uma área de cerca de 10,2 milhões de hectares, sendo que 88,8% deste total é representado pelas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul (CONAB, 2018). O Brasil é o país com a maior produção, representando cerca de 39% da produção mundial (SILALERTRUKSA & GHEEWALA, 2018; SILVA et al., 2018). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), a produção de cana-de-açúcar estimada para o ano-safra 2018/2019 é de 635,51 milhões de toneladas, aumento de 0,4% em relação à safra anterior, e a estimativa de área colhida está em 8,66 milhões de hectares. A região Centro-Sul responde por uma produção de 587,47 milhões de toneladas, 75% da produção brasileira de cana-de-açúcar. A maior parte da produção encontra-se nos estados de São Paulo (maior produtor), com uma área plantada de 4,48 milhões de hectares e uma produtividade média de 76,3 Mg ha⁻¹, Goiás com 917,1 mil ha e 77,4 Mg ha⁻¹ de produtividade e Minas Gerais com 851,3 mil ha e produtividade de 78,29 Mg ha⁻¹.

No estado de Goiás, verifica-se que a expansão das áreas de plantio destinadas a produção cana-de-açúcar ocorreu de forma mais intensa entre os anos de 2001 a 2006, preferencialmente nas microregiões Sudoeste do estado, Vale do Rio dos Bois e Meia Ponte (BARBALHO, 2013). A partir de 2006, a microrregião de Quirinópolis ganhou destaque na produção com área plantada de 58.500 ha, seguida pelos municípios de Tuverlândia (45.300 ha) e Goianésia (45.000 ha) (CANASAT, 2013, CAMPOS et al., 2014).

4.2.3. Sustentabilidade e Tecnologias Empregadas no Manejo da Cultura da Cana-de-Açúcar

A produção de cana-de-açúcar mais que dobrou nas últimas décadas para atender às demandas globais de açúcar e bioenergia e reduzir a dependência de combustíveis fósseis como o petróleo (BORDONAL et al., 2018). Em vez de expandir o cultivo para novas áreas, a estratégia para intensificação da produção sustentável tem sido sua verticalização (FACHINELLI & PEREIRA, 2015), ou seja, produzir mais na mesma área e com menos recursos (CARDOZO et al., 2018). A expansão da cana-de-açúcar, especialmente nas regiões do Cerrado brasileiro, foi seguida por uma significativa redução na produtividade de colmos, principalmente pela dificuldade de se equilibrar a qualidade técnica agrônômica à velocidade demandada da expansão (BORDONAL et al., 2018). Por outro lado, as práticas de manejo da cana-de-açúcar desenvolvidas para o bioma Mata Atlântica também eram inadequadas para aplicação no Cerrado, devido às diferenças de clima e solo (DALLEMAND et al., 2015).

Por serem consideradas áreas com solos pobres e reduzido potencial de armazenamento de água, práticas de irrigação têm sido comumente usadas para aumentar a produtividade das culturas agrícolas e garantir a estabilidade da produção (MARIN et al., 2016; CARDOZO et al., 2018). Tradicionalmente, a cana-de-açúcar é cultivada no Brasil em condições de sequeiro (sem irrigação). No entanto, com a expansão da cultura em direção a região Centro-Oeste, caracterizada por diferentes regimes hídricos e tipos de solo, tem-se adotado a irrigação a fim de se garantir altos rendimentos (KOLLN et al., 2016). Apesar do caráter argiloso de muitos solos presentes nessas áreas, como os Latossolos, estes muitas vezes se comportam como solos arenosos, devido a grande presença de óxidos de ferro que favorecem a formação de pequenos agregados estáveis semelhantes à areia, ocasionando baixa retenção de água (RESENDE et al., 1995; SCARPARE et al., 2016).

Em seu primeiro ciclo, a cana se desenvolve em um período de 12 a 18 meses (“cana de ano” e “cana de ano e meio”, respectivamente) e, após a primeira colheita, em ciclos de aproximadamente 12 meses. Em média a longevidade de um canavial é de 5 a 7 anos. Durante o ciclo, a cana-de-açúcar passa por diferentes fases fenológicas, a saber, brotação (1 mês), perfilhamento e desenvolvimento inicial (2 meses), crescimento vegetativo intenso (7 meses) e maturação (2 meses). A planta é mais sensível ao estresse hídrico nas primeiras duas fases, aumentando gradualmente o volume de água consumido durante a fase de crescimento vegetativo mais intenso. Na fase de maturação, a demanda hídrica é reduzida substancialmente (GUARENGHI & WALTER, 2016) e o estresse hídrico moderado é

favorável para o acúmulo de sacarose nos colmos. Para assegurar a produção máxima de colmos são necessários cerca de 1.400 a 2.500 mm de água para cada ciclo da cultura, a depender do déficit hídrico da região (BRAUMAN & VIART, 2016). No estado de São Paulo, em áreas de Mata Atlântica, o cultivo da cana-de-açúcar é favorecido pela melhor distribuição de chuvas e melhores condições de solos em comparação com o Cerrado, ocorrendo menor déficit hídrico e diminuindo a demanda de irrigação. Contudo, com a expansão da cana-de-açúcar para o Cerrado, tanto de São Paulo quanto dos demais estados da região Centro-Sul, a busca pela adoção da suplementação de parte da deficiência hídrica através da irrigação e/ou práticas de manejo têm se intensificado.

A utilização de resíduos da indústria sucroalcooleira, como a torta de filtro e a vinhaça, tem sido empregada como uma estratégia para a melhoria das condições de solo em áreas com fatores de produção mais limitantes (PINA et al., 2015). Vinhaça é o principal resíduo da indústria de biocombustível produzido a partir da cana de açúcar, onde são produzidos, em média, 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol, contendo alto teor de potássio (K) e, atualmente, é destinada às áreas de produção na forma de fertirrigação. A cana-de-açúcar é a segunda cultura mais irrigada do país (20% do total de áreas irrigadas), onde em 98% dessas áreas irrigadas é praticada a irrigação suplementar ou de salvamento (ANA, 2017b). A “irrigação de salvamento”, tem sido uma prática bastante utilizada nas usinas, nos períodos de maior déficit hídrico, para melhorar a brotação da cultura após o plantio ou colheita, onde se usa, principalmente, vinhaça em baixos níveis de aplicação - 150 m³ ha⁻¹ (BORDONAL et al., 2018). O bagaço e a torta de filtro, rica em fósforo (P), também têm sido utilizados pela indústria na recuperação de solos deficientes em nutrientes e com baixo aporte de matéria orgânica, contribuindo ainda para a correção da acidez do solo e para o aumento da capacidade de retenção de água (PINA et al., 2015).

Os conhecimentos sobre solos, clima e demais particularidades do cultivo da cana-de-açúcar contribuem para a eficiência tecnológica direcionada ao alcance de maiores produções com o mínimo de áreas e insumos necessários. As características de solo e clima são fatores-chave que devem ser integrados aos sistemas produtivos, pois afetam diretamente o rendimento da cultura no campo. Visando identificar as áreas de possível expansão e intensificação do cultivo da cana-de-açúcar, vários trabalhos foram realizados neste sentido, como os zoneamentos “agroclimáticos” e “agroecológicos” da cana-de-açúcar (MANZATTO et al., 2009).

4.2.4. Zoneamento Agroclimático e Agroecológico da Cana-de-Açúcar

O zoneamento tem por objetivo identificar e classificar zonas homogêneas quanto ao desenvolvimento das atividades agrícolas, visando o incremento da produtividade e da renda em bases sustentáveis. Este zoneamento fornece o potencial de terras aptas ao plantio da cultura, que se conjugado as áreas atualmente sob plantio, fornece o potencial de expansão da cana-de-açúcar por regiões de interesse.

O zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar fornece subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas à expansão e produção sustentável da cultura, realizando o zoneamento de aptidão climática e pedológica, onde os principais indicadores são: temperatura, deficiência hídrica, declividade e tipo de solo. Com isso, é possível identificar áreas mais adequadas ao cultivo da cana-de-açúcar e as regiões onde existem restrições para o seu desenvolvimento. Existem dois tipos de zoneamento agroclimático: zoneamento de aptidão climática, onde se utilizam variáveis de solo, clima e planta com o objetivo de mostrar o potencial produtivo da cultura em uma determinada região; e o zoneamento agrícola de risco climático, onde se utilizam ferramentas estatísticas com o objetivo de quantificar os riscos de perda das lavouras, devido a ocorrência de eventos climáticos adversos (MANZATTO et al., 2009).

Já o zoneamento agroecológico vai além do zoneamento agroclimático, destinado principalmente para atender ao seguro rural. O zoneamento proposto envolve além das cartas de solo e clima, as de uso do solo, topografia, hidrografia e restrições legais, visando também a formulação de políticas que estimulem a expansão da cana-de-açúcar em áreas estratégicas e que promovam o ordenamento da expansão da atividade (MANZATTO, 2008).

Para a avaliação da aptidão climática são utilizadas séries históricas climáticas por municípios, definindo em função do ciclo e da demanda hídrica da cultura, ocorrência de geadas e veranicos, as melhores áreas e épocas para o cultivo. As variáveis utilizadas na delimitação dessas áreas são: temperatura média do ar, deficiência hídrica anual e risco de geada. A aptidão pedológica é baseada no potencial de produção agrícola de cada classe de solo para uma determinada cultura sob determinado tipo de manejo, levando-se em conta as características físicas e fisiográficas desses solos (MANZATTO et al., 2009).

Nestes sistemas, as áreas aptas ao cultivo e expansão da cana-de-açúcar foram agrupadas por tipo de uso atual da terra (Ac – Agricultura; Ag – Agropecuária; Ap – Pastagem) e por classe de aptidão agrícola para cada estado da Federação. Nas **Tabelas 1 e 2**,

tem-se a estimativa dessas áreas para os estados da região Centro-Oeste e áreas totais para o Brasil, respectivamente.

Tabela 1. Áreas aptas à expansão do cultivo de cana-de-açúcar na Região Centro-Oeste (Manzatto et al., 2009).

Classes de aptidão	Áreas aptas por tipo de uso da terra por classe de aptidão (ha)				
	Ap	Ag	Ac	Ap+Ag	Ap+Ag+Ac
Alta (A)	6.209.273,48	0	1.036.777,40	6.209.273,48	7.246.050,88
Média (M)	10.402.133,93	0	10.471.289,21	10.402.133,93	20.873.423,14
Baixa (B)	1.862.381,46	0	302.573,80	1.862.381,46	2.164.955,26
A+M	16.611.407,41	0	11.508.066,61	16.611.407,41	28.119.474,02
A+M+B	18.473.788,87	0	11.810.640,41	18.473.788,87	30.284.429,28

Tabela 2. Áreas aptas à expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil (Manzatto et al., 2009).

Classes de aptidão	Áreas aptas por tipo de uso da terra por classe de aptidão (ha)				
	Ap	Ag	Ac	Ap+Ag	Ap+Ag+Ac
Alta (A)	11.302.342,95	600.766,55	7.360.310,26	11.903.109,50	19.263.419,76
Média (M)	22.863.866,09	2.126.394,55	16.496.735,67	24.990.260,64	41.486.996,31
Baixa (B)	3.041.122,07	483.326,14	731.076,97	3.524.448,21	4.255.525,18
A+M	34.166.209,05	2.727.161,10	23.857.045,93	36.893.370,15	60.750.416,07
A+M+B	37.207.331,12	3.210.487,24	24.588.122,90	40.417.818,36	65.005.941,25

Uma abordagem semelhante aos trabalhos realizados na definição dos zoneamentos agroclimáticos e agroecológicos é a definição de grupos de manejo e ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar. A definição dos grupos de manejo tem como objetivo o grupamento de solos com características semelhantes (textura, declividade, retenção de água, fertilidade, drenagem) para determinado manejo específico (preparo do solo, época de plantio e colheita, fertilidade, irrigação), o que se faz necessário devido o grande número de unidades de mapeamento identificadas nos levantamentos de solos e que tendem a dificultar a operacionalização dessas práticas em larga escala nas usinas. Nos ambientes de produção, efeitos das práticas de manejo (fertilização, irrigação, espaçamento etc.), tipo de solo e clima na produtividade da cultura são extensivamente avaliados (BATTIE & LACLAU, 2009; JUNIOR et al., 2017).

4.3. Ambientes de Produção

Para Landell et al. (2003) e Prado (2013), os ambientes de produção são definidos como a interação das condições de solo (textura, profundidade, disponibilidade hídrica e

fertilidade) com as condições climáticas da região (precipitação, evapotranspiração e déficit hídrico), onde são delimitadas zonas de manejo específicas em função das potencialidades e limitações de cada ambiente, estimando-se o potencial produtivo da cultura. A qualificação do ambiente de produção proporciona a adoção de estratégias de manejo que reúnem áreas mais homogêneas e a alocação correta das variedades de cana-de-açúcar, explorando-se o máximo potencial genético da cultura e, conseqüentemente, reduzindo os custos operacionais e aumentando a longevidade do canavial (CAVALCANTE & PRADO, 2010). O manejo básico da cultura nos ambientes considera que é feito corretamente o preparo do solo e plantio, controle de plantas invasoras e manejo fitossanitário, época de plantio e colheita, além da escolha varietal em relação aos ambientes e doses adequadas de corretivos e fertilizantes (VITTI & PRADO, 2012).

O solo é apenas um dos componentes de um complexo conjunto de fatores de produção, tendo a importante função de fornecer às plantas suporte físico, nutrientes e água. Sendo assim, o conhecimento das características intrínsecas de cada solo, os chamados fatores edáficos, é importante para julgar o potencial de produção agrícola (MAULE et al., 2001).

4.3.1. Morfologia, Mineralogia e Disponibilidade Hídrica do Solo

Na pedologia, os horizontes diagnósticos ou pedogenéticos estão relacionados a características que melhor expressam a sua formação (gênese), e fornecem informações essenciais para o manejo e uso agrícola dos solos dos quais são representativos. Devido ao fato de as manifestações antrópicas serem menos acentuadas em profundidade, os pedólogos utilizam na diagnose das classes de solo os horizontes de subsuperfície, quando existentes (EMBRAPA, 2018). O conhecimento dos atributos químicos, físicos e morfológicos desses horizontes diagnósticos é fundamental para a definição das classes de solo e para o estudo dos ambientes de produção de cana-de-açúcar, pois é a parte do volume do solo que será explorado pelo sistema radicular da cultura, especialmente nos ciclos de crescimento da cana-de-açúcar de segundo corte em diante, denominada no setor sucroalcooleiro de cana-soca (LANDELL et al., 2003).

O entendimento das propriedades do solo é fundamental para o setor agrícola, tendo em vista a necessidade de adoção de estratégias para um manejo adequado dos diversos sistemas de produção. Vários trabalhos demonstraram a influência dos atributos do solo na produtividade da cana-de-açúcar, com diferentes respostas para a camada arável (que sofre maior influência das práticas de manejo) e para a camada subsuperficial (LANDELL et al.,

2003). Para Bittencourt et al. (1990), clima e um manejo adequado tem maior influência na produtividade final da cana-de-açúcar do que a fertilidade do solo na camada arável. Fatores climáticos (radiação solar e déficit hídrico) e manejo correspondem a 85% da variabilidade da eficiência produtiva da cana de açúcar, ao passo que as condições de solo representam 15% dessa variabilidade (MARIN & CARVALHO, 2012). Por outro lado, a produtividade da cultura também mostra correlações significativas com os atributos químicos subsuperficiais (PRADO et al., 1998; BARBOSA et al., 2018).

A textura é uma importante propriedade do solo, pois afeta infiltração, armazenamento de água, aeração e fertilidade, uma vez que influi na área de contato entre as partículas sólidas e a água. Devido a sua relativa estabilidade e aos seus efeitos de superfície livre, é de grande importância na descrição, identificação e, principalmente, na classificação do solo (HILLEL, 2002a; FERREIRA, 2010). Segundo Gupta & Larson (1979) vários trabalhos demonstraram que a capacidade de água disponível (CAD) é a diferença na retenção de água correspondente a dois potenciais matriciais, - 6 e - 1.500 kPa. Na porção superior desta faixa de potencial matricial a umidade do solo está relacionada, além da textura, aos aspectos estruturais do solo. Já na porção inferior, a umidade do solo está associada essencialmente ao teor de argila. Segundo Hillel (2002b), ao contrário da textura, a estrutura do solo é fortemente alterada pelas práticas de manejo adotadas nos sistemas agrícolas. Estrutura pode ser definida como o arranjo ou organização das partículas (areia, silte e argila) do solo, formando os agregados e o sistema poroso. A estrutura desempenha papel fundamental na determinação da retenção e transporte de água, gases e nutrientes no solo (ZHAO et al., 2016).

Já a variabilidade nas propriedades físicas do solo em diferentes ambientes, tais como densidade, porosidade e os conteúdos de areia, silte e argila, resultam em alterações nas características de retenção e na capacidade de água disponível (CAD) dos solos (Abel et al., 2013). A disponibilidade de água não controla somente o ambiente físico de crescimento para as plantas, mas também pode afetar as condições químicas e biológicas do solo, podendo alterar as características dos ambientes ao longo do tempo (ASGARZADEH et al., 2014). A condição de restrição hídrica influencia diretamente na transpiração da planta, provocando o fechamento dos estômatos, redução na absorção de CO₂ e, conseqüentemente, na taxa fotossintética e produção de açúcares (VAN LIER, 2010). Machado et al. (2009) verificaram redução no teor de sólidos solúveis e matéria seca na cana-de-açúcar devido à redução da taxa fotossintética. Quanto mais intenso e duradouro for o déficit hídrico, maior será a ocorrência

de entrenós curtos, o que reduz o volume do parênquima utilizado para armazenamento de sacarose na cana-de-açúcar (CÂMARA, 1993).

A disponibilidade de água é um dos fatores que mais afeta a variabilidade da produção de cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005; LIU et al., 2016), especialmente na região do Cerrado, onde se tem uma má distribuição de chuvas e que, dependendo da fase de desenvolvimento em que a cultura se encontra, pode contribuir para baixas produtividades (LANDELL et al, 2003; REICHARDT & TIMM, 2012). Exceto em locais que utilizam irrigação para fornecimento de água às culturas, a disponibilidade de água é regida pela distribuição da chuva e pelo potencial de armazenamento de água no solo, que é condicionado pela sua capacidade de retenção e drenagem (ZHAO et al., 2017). A capacidade de retenção é bastante variada dependendo da distribuição do tamanho de poros do solo. Já a drenagem é função da macro porosidade e altura do lençol freático (MAULE et al., 2001). A realização de manejos do solo que favoreçam o desenvolvimento do sistema radicular, evitando ou corrigindo os impedimentos químicos, físicos e biológicos, associados a manejos da cultura para redução da evapotranspiração, favorecem a permanência de água disponível no solo por um período de tempo maior, garantindo maior estabilidade na produtividade dos canaviais (VITTI & PRADO, 2012).

A principal resposta da cana-de-açúcar ao déficit hídrico é a redução do número de folhas fotossinteticamente ativas (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005). Por outro lado, o alongamento do colmo é mais sensível do que o alongamento foliar em condições de deficiência hídrica, ou seja, a planta reduz a formação e alongamento de novos entrenós antes de ocorrer a redução da área foliar, podendo ter o desenvolvimento foliar sem desenvolvimento do colmo (BARBOSA, 2017).

4.3.2. Classes de Solo

Por se tratarem de sistemas complexos, o estudo dos solos é realizado por meio de modelos e teorias que possibilitem sua compreensão e que permitam fazer inferências sobre sua dinâmica e comportamento no ambiente em que estão inseridos. Essa complexidade se dá devido aos diferentes ambientes e processos pedogenéticos que esses solos são submetidos ao longo do tempo, agindo diretamente sobre seu material de origem (rocha). Foram criados então os sistemas de classificação de solos, com a intenção de promover e facilitar a compreensão e a transferência dessas informações (BUOL et al., 1981).

Com o avanço do conhecimento sobre os solos brasileiros, foi desenvolvido o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2013), um sistema hierárquico, multicategórico e aberto, que permite identificar os solos desde classes mais gerais até subdivisões específicas. A princípio, se tinha como base para classificação dos solos brasileiros os sistemas estrangeiros, tais como o Soil Taxonomy e a Legenda da FAO para o Mapa de Solos do Mundo. Porém, esses sistemas se apresentaram inapropriados para descrição e identificação de alguns atributos, como por exemplo, estabeleciam uma seção de controle de 200 cm para análise de perfis, o que para alguns solos brasileiros, como os Latossolos, que apresentam horizonte A húmico mais espesso que 200 cm, não refletiam sua realidade, ficando sua classificação comprometida (ANJOS et al., 2012).

A chave de classificação do SiBCS é organizada em 6 níveis categóricos, onde os quatro primeiros níveis são denominados de *ordens*, *subordens*, *grandes grupos* e *subgrupos*, sendo que o 5º e 6º nível categórico, *famílias* e *séries*, respectivamente, ainda se encontram em discussão (Embrapa, 2018). O sistema compreende atualmente 13 ordens de solos, separadas por suas características morfo-estruturais predominantes na gênese do solo, como a presença ou ausência de atributos ou horizontes diagnósticos, as quais refletem diferenças no tipo e grau de desenvolvimento pedogenético. Material de origem, grau de intemperismo, estruturação, estabilidade de agregados, textura e estrutura são aspectos secundários, hierarquizados dentro de cada classe e que são de grande importância agrônômica (ANJOS et al., 2012).

O conhecimento sobre a morfologia do solo é importante para se avaliar seu comportamento frente a diferentes práticas de manejo e comparar características e propriedades físico-hídricas entre diferentes classes, visto que estas tendem a se comportar de maneiras distintas (CARVALHO, 2002). O desenvolvimento da cana-de-açúcar nos primeiros dois anos é pouco influenciado pelas condições do horizonte subsuperficial dos solos. As condições de subsuperfície (químicas, físico-hídricas e morfológicas) passam a influenciar mais significativamente a partir do terceiro ano na cultura, onde há o maior desenvolvimento do sistema radicular em profundidade. A condição química do horizonte subsuperficial é um fator determinante na produtividade da cana-de-açúcar, ampliando-se essa correlação com a produtividade com o avançar dos cortes (VITTI & PRADO, 2012).

Landell et al. (2003), verificou que a produtividade nas soqueiras decresceu significativamente de acordo com a condição química do horizonte subsuperficial de várias

classes de solo e diferentes texturas na seguinte ordem: eutrófico > distrófico > álico > ácrico, conforme a **Figura 1**.

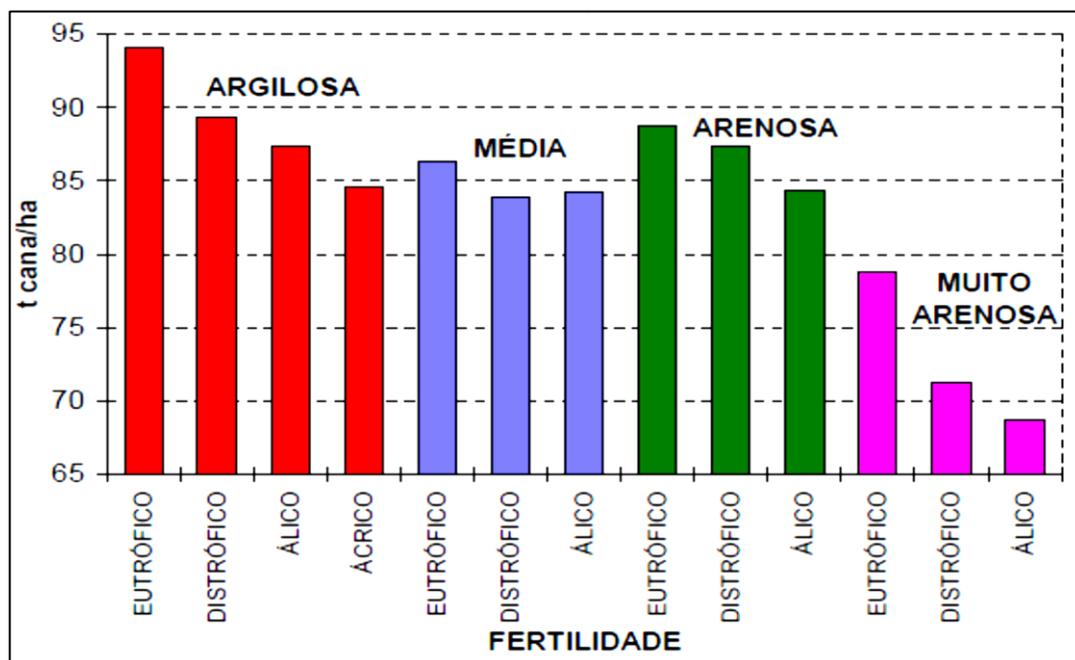


Figura 1. Produtividade média (TCH) da cultura da cana-de-açúcar de acordo com as características químicas subsuperficiais de diferentes classes de solo (Landell et al., 2003).

No que diz respeito à disponibilidade hídrica, Prado et al. (2016) propuseram seis classes de disponibilidade para os principais solos ocupados com a cultura da cana-de-açúcar para a região Centro-Sul, levando em consideração atributos físicos, morfológicos e climáticos (evapotranspiração potencial) (**Tabela 3**).

Tabela 3. Classes de disponibilidade de água e volume de água disponível para três níveis de evapotranspiração potencial (Prado et al., 2016).

Água Disponível (dia mês ⁻¹)	Classe de disponibilidade de água	Volume de água disponível necessária em função da evapotranspiração potencial diária (L m ⁻³)		
		3 mm dia ⁻¹	5 mm dia ⁻¹	7 mm dia ⁻¹
> 25	ADA - água disponível alta	>75	> 125	> 175
20 - 25	ADM - água disponível média	60 - 75	100 - 125	140 - 175
15 - 20	ADB - água disponível baixa	45 - 60	75 - 100	105 - 140
10 - 15	ADMB - água disponível muito baixa	30 - 45	50 - 75	70 - 105
5 - 10	ADEB - água disponível excessivamente baixa	15 - 30	25 - 50	35 - 70
< 5	ADEXB - água disponível extremamente baixa	< 15	< 25	< 35

De acordo com essa classificação, solos com alta disponibilidade de água (ADA), por exemplo, podem fornecer água para a cultura por um período superior a 25 dias, ao passo que solos com água disponível muito baixa podem fornecer água por no máximo 15 dias. A evapotranspiração potencial da região pode influenciar a classe de disponibilidade de água, por exemplo, a classe de disponibilidade de água de um Nitossolo pode variar de ADA a ADMB somente em função da evapotranspiração (**Tabela 4**).

Tabela 4. Classes de disponibilidade de água para três solos da região Centro-Sul do Brasil (adaptado de Barbosa, 2017).

Solo	Evapotranspiração potencial diária			Água disponível (L m ⁻³)
	3 mm dia ⁻¹	5 mm dia ⁻¹	7 mm dia ⁻¹	
Nitossolo Vermelho textura argilosa	ADA	ADB	ADMB	97
Latossolo Vermelho eutrófico textura média	ADB	ADEB	ADEB	78
Neossolo Quartzarênico	ADEB	ADEXB	ADEXB	45

Nos ambientes de produção que impõem menos restrição à cultura, Prado (2013) inclui a presença de solos como Latossolos Vermelhos (LV) e Nitossolos (N), ambos eutróficos originados de basalto, uma vez que estes solos apresentam uma elevada capacidade de água disponível (CAD) e boa fertilidade quando bem manejados, fazendo com que a planta tenha um desenvolvimento vegetativo mais vigoroso e intenso. Chernossolos, Cambissolos e Argissolos também estão presentes nos ambientes menos restritivos (PÁDUA JUNIOR, 2016). Os Neossolos Quartzarênicos e Litólicos estão presentes nos ambientes classificados como mais restritivos, uma vez que apresentam muito baixa disponibilidade de água (PRADO, 2013), o que afeta diretamente o acúmulo de biomassa e sacarose da cana-de-açúcar (INMAM-BAMBER, 2004).

4.3.3. Fatores Climáticos

Por ser uma planta de origem tropical, a cana-de-açúcar desenvolve-se bem em climas quentes, com temperaturas mínimas para seu desenvolvimento entre 18 e 20 °C e máximas entre 35 e 38 °C (CASTRO, 2016). A produção de biomassa é dependente da duração da cultura no campo (dias), da irradiância solar incidente diária na superfície terrestre (MJ m⁻² dia⁻¹) e da porcentagem da radiação que é interceptada pelas folhas. Precipitação, temperatura

do ar e radiação solar são os principais fatores climáticos responsáveis pelo rendimento da cultura no campo (BARBOSA, 2017).

Regimes climáticos mais severos (altas temperaturas e baixa precipitação, por exemplo) associados a solos com limitações físico-químicas (baixa fertilidade, baixa retenção de água, solos rasos) formam o pior conjunto de ambientes, ou seja, são os ambientes mais restritivos ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Por outro lado, clima mais ameno e solos com melhores propriedades físicas e químicas, formam o outro polo. No Brasil, devido a sua grande extensão territorial e por ser um dos mais tradicionais produtores de cana-de-açúcar, esta é cultivada em vários tipos de solos que estão sob a influência de diferentes climas, resultando em inúmeros ambientes para sua produção (MAULE et al., 2001). O clima dificilmente varia dentro de uma mesma propriedade rural, portanto, define-se o clima regional e se realiza o cruzamento com as informações dos diferentes solos encontrados.

4.3.4. Métodos de Classificação de Ambientes de Produção de Cana-de-Açúcar

A classificação dos ambientes de produção tem sido uma ferramenta importante na obtenção de maiores produtividades associadas ao uso adequado e sustentável dos fatores de produção (BARBOSA, 2017). Os sistemas de mapeamento de solos foram amplamente utilizados na indústria canavieira no final dos anos 70, como base para a escolha dos locais mais adequados de instalação das usinas e destilarias que faziam parte do Programa Proálcool. Esses mapas de solos foram derivados de trabalhos realizados pelo Centro Nacional de Pesquisa e Ensino Agrônomo (CNEPA) e pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS). Posteriormente, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) produziu mapas de solos do estado de São Paulo nas escalas de 1:100.000 e 1:250.000, porém, essas escalas eram inadequadas para as operações de campo diárias, sendo comum não encontrar correlação entre o tipo de solo e produtividade (toneladas de cana por hectare - TCH) ao cruzar esses dois parâmetros (DONZELLI & BERTOLANI, 2018).

Em 1992, O Centro de Tecnologia Coopersucar (CTC – atualmente o Centro de Tecnologia Canavieira) definiu os ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar baseando-se unicamente nas condições químicas pedológicas das classes de solo e suas relações com os rendimentos de diferentes variedades de cana-de-açúcar (CAVALCANTE & PRADO, 2010). Como resultado desse trabalho, em 1994 foi lançado o sistema chamado “Ambientes de Produção” para cana-de-açúcar (JOAQUIM et al., 1994). Neste sistema, os diferentes solos foram agrupados em cinco classes A, B, C, D e E (onde “A” equivale a solos

com alto potencial de produção e “E” a solos com baixo potencial), associados a dados históricos de produção, conforme apresentado na **Figura 2**.

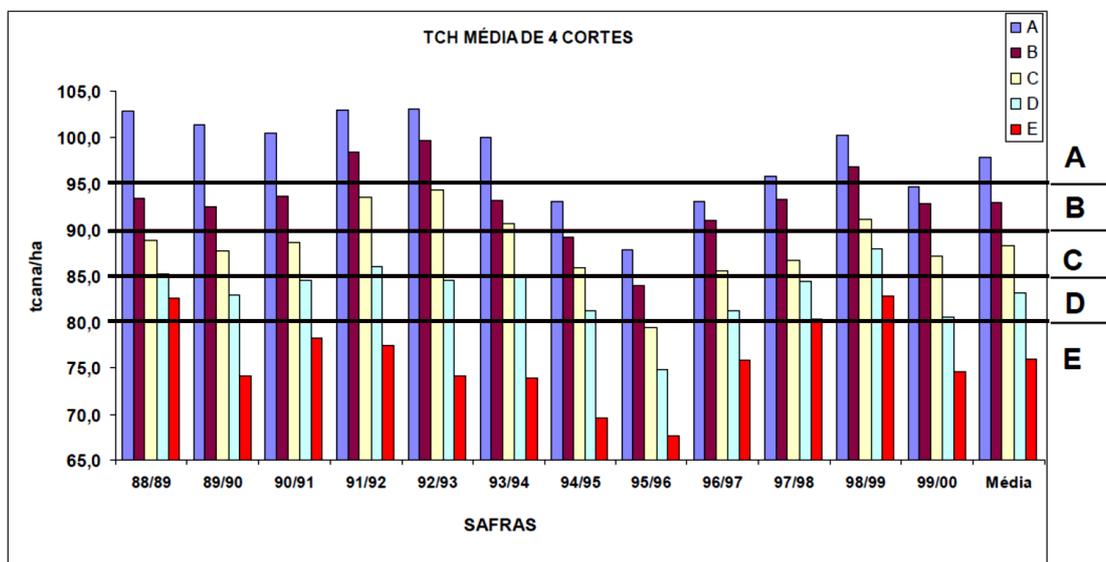


Figura 2. Produtividade média de 4 corte para cada ambiente de produção ao longo de 12 anos (Donzelli, 2007).

Com a definição das classes de potencial de produção (ambientes), como as apresentadas na Figura 3, foi possível determinar as faixas de produtividade média de cana de açúcar para cada ambiente (**Tabela 5**).

Tabela 5. Expectativa de produtividade de cana-de-açúcar (TCH – média de 4 cortes) para cada ambiente de produção (adaptado de Joaquim et al., 1997).

Ambiente de Produção	Potencial de produtividade	Toneladas de Colmo por Hectare (TCH)
A	Alto	≥ 95
B	Médio / Alto	90 - 95
C	Médio	85 - 90
D	Médio / Baixo	80 - 85
E	Baixo	≤ 80

Mais tarde, com a inclusão de zonas climáticas, esse sistema passou a ser chamado de “ambientes edafoclimáticos de produção”, quando o conceito final foi apresentado (JOAQUIM et al., 1997). O sistema até então é baseado em mapas detalhados de solos (escala < 1:20.000) agrupados em classes (A, B, C, D e E), e várias zonas climáticas existentes nas regiões Centro-Sul destinadas ao cultivo da cana (zonas climáticas I, II, III, IV e V, onde “I”

são as regiões com condições climáticas mais adequadas ao cultivo e “V” são as regiões onde o clima impõe limitações ao desenvolvimento da cultura) (DONZELLI & BERTOLANI, 2018). Essa nova classificação é apresentada na **Tabela 6**.

Tabela 6. Potencial de rendimento médio esperado (TCH – média de 5 cortes) para diferentes climas e ambientes de produção (adaptado de Joaquim et al., 1997; Bertolani et al., 2015).

Zonas Climáticas	Ambientes de Produção (Solos)				
	A	B	C	D	E
I	101	96	90	85	78
II	97	91	86	82	75
III	91	87	82	77	70
IV	87	83	78	74	67
V	82	78	74	70	64

Posteriormente o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) lançou o sistema designado Ambicana, onde Prado (2011) redefiniu os ambientes de produção de cana-de-açúcar em função das condições físico-hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos, sob manejo adequado da camada arável (calagem, adubação, palha, controle de ervas daninhas e pragas) sempre associadas com as propriedades da subsuperfície dos solos e, principalmente, com o clima local (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação). Com relação a esse novo sistema de classificação dos ambientes, as principais mudanças foram: a média de produtividade (TCH) passou a ser contabilizada em 5 cortes, ao invés de 4 cortes do sistema proposto pelo Centro de Tecnologia Canavieira; introduziu-se dados de água disponível em função da evapotranspiração, o que permitiu o julgamento da produtividade do solo em função também do clima; ampliou os ambientes para 10 classes e criou classes de capacidade de troca de cátions para os solos.

De acordo com a classificação proposta por Prado (2016), os ambientes de produção de cana-de-açúcar são divididos em 5 categorias principais, representados por letras que vão de "A" (melhor ambiente) até "E" (ambientes mais restritivos), onde essas classes se subdividem (A1, A2, por exemplo) em função das limitações de cada classe de solo. Nos ambientes menos restritivos utiliza-se variedades mais responsivas e menos rústicas, onde a melhor época de plantio ocorre entre os meses de fevereiro a meados de maio, período em que a disponibilidade de água dos solos presentes nesses ambientes permite evitar o estresse hídrico por parte da planta. Já em ambientes de produção mais restritivos, onde os solos

apresentam uma baixa disponibilidade hídrica, o período de plantio é mais curto (abril a maio), antes que acabe o armazenamento de água e a planta sofra estresse hídrico. Essa nova classificação dos ambientes de produção é apresentada na **Tabela 7**.

Tabela 7. Ambientes de produção de cana-de-açúcar - Ambicana (adaptado de Prado, 2016).

Ambientes de produção de cana-de-açúcar – IAC			
Ambiente	TCH (média 5 cortes)	Atributos	Solos
A1	> 100	ADA, eutr, CTC alta ADM, eutr, CTC alta	*
A2	96 - 100	ADMA, eutr, CTC média/alta ADA, eutr, CTC média/alta	PVe ² , PEe ² , TRe, LRe, LEe, LVe
B1	92 - 96	ADM, mesotr, CTC média/alta ADB, eutr, CTC média/alta	LRm, LEm, LVm, PEm ² , PVm ² PVm ² , PEm ² , LRe, LRm, LEe, LEm
B2	88 - 92	ADM, mesotr, CTC média/alta ADB, eutr, CTC média/alta	PVm ² , PEm ² , TRm, LRm, LEm, LVm PEe ³ , PVe ³
C1	84 - 88	ADB, distr, CTC média/alta ADB, distr, CTC média	LRd, LEd PVd ² , PEd ²
C2	80 - 84	ADB, eutr, CTC baixa ADB, distr, CTC baixa	LEe, LVe LEd, LVd
D1	76 - 80	ADB, acr, CTC média/alta ADM, malic, CTC média/alta	LRac, LEac, LVac PVmalic, PEmalic
D2	72 - 76	ADB, malic, CTC média/baixa ADB, alic, CTC média/baixa	LEmalic, LVmalic PVa ² , PEa ²
E1	68 - 62	ADMB, alic, CTC média ADB, malic, CTC média	PVa ³ , PEa ³ PVa ⁴ , PEa ⁴
E2	< 68	ADMB, alic, CTC baixa ADMB, eutr, CTC baixa	PVa ⁴ , PEa ⁴ , AQd, AQA PVe ⁴ , PEe ⁴

LR: Latossolo Roxo; **LE:** Latossolo Vermelho Escuro; **TR:** Terra Roxa Estruturada; **LV:** Latossolo Vermelho-marelo; **PV:** Podzólico Vermelho-Amarelo; **PE:** Podzólico Vermelho-Escuro; **AQ:** Areia Quartzosa.

eutr: eutrófico; **mesotr:** mesotrófico; **distr:** distrófico; **acr:** ácrico; **malic:** mesoálico; **alic:** álico.

ADMA: água disponível muito alta; **ADA:** água disponível alta; **ADM:** água disponível média; **ADB:** água disponível baixa; **ADMB:** água disponível muito baixa.

⁽¹⁾Horizonte B iniciando-se na superfície do solo;

⁽²⁾Horizonte B iniciando-se de 20 - 50 cm;

⁽³⁾Horizonte B iniciando-se de 50 - 100 cm;

⁽⁴⁾Horizonte B iniciando-se a mais de 100 cm e textura arenosa no horizonte A;

*O ambiente A1 é atingido em decorrência do manejo intensivo nos ambientes A2.

A partir da definição dos ambientes de produção ocorre o manejo varietal da cultura, onde uma rede de instituições de melhoramento de cana-de-açúcar (Centro de Tecnologia Canavieira, Instituto Agrônomo de Campinas e RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do setor Sucroalcooleiro) classificam as cultivares em função do ambiente de produção, visando alocar a cultivar mais apta a determinado ambiente para que se possa melhor explorar seu potencial produtivo (BARBOSA, 2017). Atualmente, 22 anos após a criação dos primeiros sistemas visando a identificação dos ambientes de produção, vários outros sistemas derivados têm sido criados ou atualizados. No entanto, esta tecnologia precisa

ser melhor entendida pelos técnicos e engenheiros agrônomos, onde frequentemente, mapas de solos em escalas inadequadas são utilizados para derivar ambientes de produção, resultando em falhas na alocação e desempenho de variedades, manejo e classificação desses ambientes (DONZELLI & BERTOLANI, 2018).

A classificação e mapeamento dos ambientes de produção é fundamental para se aplicar o manejo agrônômico adequado e se atingir níveis elevados de eficiência de uso de água e produtividade. Os parâmetros e métodos acima apresentados são tecnicamente sólidos e bem dominados pelo setor sucroenergético. Contudo, por serem intensos em demanda de mão-de-obra e recursos financeiros, justifica-se buscar alternativas e ferramentas para facilitar e agilizar a caracterização de novas áreas, o que pode ser obtido a partir da utilização do sensoriamento remoto.

4.4. Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura

Atualmente, o setor produtivo agrícola tem buscado a obtenção de estimativas de produção que sejam cada vez mais rápidas, confiáveis e que diminuam os custos de produção. O desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de SR auxiliam em estudos de larga escala, tais como previsões de fenômenos ambientais, avaliação e monitoramento de áreas agrícolas e estimativas de safra (COUTO JUNIOR, 2007). As imagens de satélite se tornaram ferramentas essenciais para monitoramento da vegetação, fornecendo informações de maneira rápida, especialmente em áreas que são pouco acessíveis a pesquisas de campo devido a aspectos limitantes da topografia e vegetação densa (VARGA et al., 2015; SZABÓ et al., 2016). A principal vantagem da utilização das imagens de sensores remotos, principalmente na agricultura, está no fato da possibilidade de obtenção de informações e estimativas agronômicas sobre uma determinada cultura de interesse em extensas áreas e a baixos custos (BÉGUÉ et al., 2010; ANTUNES et al., 2015).

Nos estudos que se envolvem a vegetação, solo e água, destacam-se as transformações espectrais que dão origem a determinados índices, em geral utilizados como intermediários na geração de parâmetros biofísicos e no acompanhamento da dinâmica sazonal desses elementos (FERREIRA et al., 2008). Para análises espaciais a nível regional, Ladányi et al. (2015) afirmam que imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), cuja resolução espacial está entre 250 e 1.000 metros, são apropriadas para estudos que envolvam o monitoramento de áreas de produção e que são baseados em índices de vegetação como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Para estudos

que são realizados em escala local, são requeridos pelo menos de 10 a 30 metros de resolução espacial, tornando possíveis os trabalhos que necessitem de um maior detalhamento dos alvos de interesse (TAHERZADEH & SHAFRI, 2013). Desde o lançamento dos satélites imageadores da série Landsat (Land Remote Sensing Satellite) em 1972 e, mais recentemente, da disponibilização gratuita de imagens do satélite europeu Sentinel-2A, lançado em junho de 2015 pela ESA (European Space Agency), aumentaram-se substancialmente os trabalhos envolvendo o monitoramento e mapeamento da cobertura terrestre (HANSEN & LOVELAND, 2012).

No entanto, segundo Lillesand & Kiefer (2000), é preciso que o usuário das ferramentas de sensoriamento remoto conheça as respostas ou curvas espectrais dos alvos de interesse, e também saiba as características dos sensores orbitais que se vai trabalhar, para que possa escolher o melhor critério de classificação e composição das imagens (bandas do espectro eletromagnético), pois este conhecimento interferirá diretamente na interpretação dos resultados obtidos.

4.4.1. Índices de Vegetação

Observando-se a curva espectral média da vegetação fotossinteticamente ativa (**Figura 3**) é possível verificar três regiões distintas, que compreendem a faixa do visível (0,40 até 0,74 μm), onde se observa uma reflectância baixa em virtude da absorção da radiação incidente pelos pigmentos presentes na estrutura celular das plantas, como as clorofilas a e b e carotenoides, uma segunda região que abrange a faixa do infravermelho próximo (0,74 a 1,40 μm), dominado pela estrutura celular das folhas provocando alta reflectância e, por fim, a faixa que compreende o infravermelho médio, dominado pelo teor de água contido nas folhas, o qual provoca picos de absorção em 1,40 e 1,95 μm e diminuição na reflectância na curva espectral da cultura (SIMÕES et al., 2003).

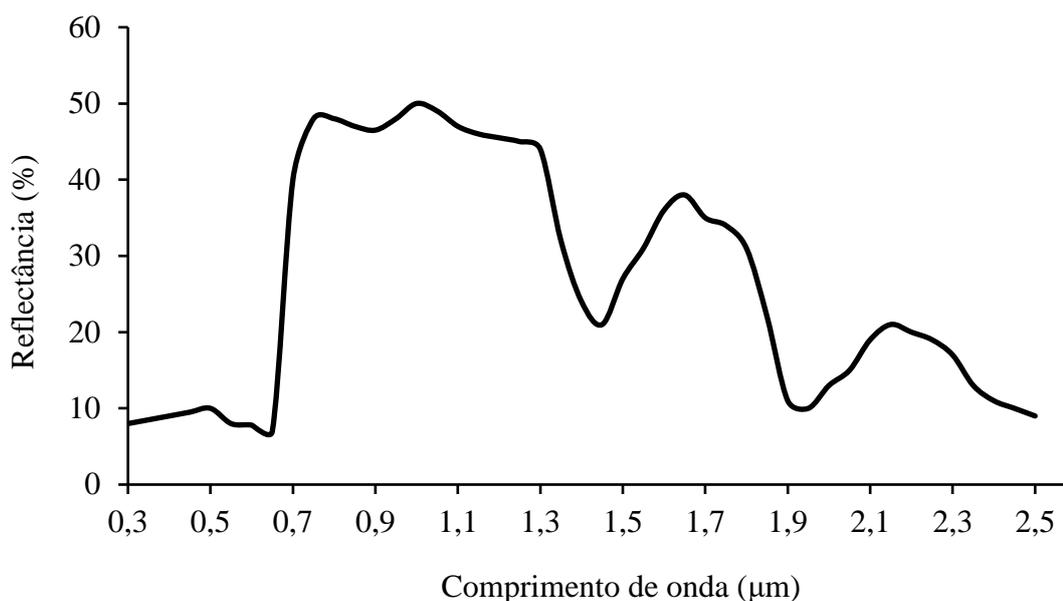


Figura 3. Curvas de reflectância típicas da vegetação sadia (adaptado de Filho et al., 2008).

Justamente em virtude da diferença nos valores de reflectância nas faixas do visível (0,40 a 0,74 μm) e do infravermelho próximo (0,74 a 1,40 μm) e das diferenças nas informações contidas nestas faixas do espectro, é que os índices de vegetação (IV's) foram concebidos (**Tabela 8**) e, baseados fundamentalmente nestas diferenças é que se usam razões entre as bandas espectrais, para poder inferir sobre as condições de vigor e produtividade da vegetação (WIEGAND et al., 1991; SIMÕES et al., 2003). Variedades de uma mesma cultura podem apresentar diferentes valores de reflectância de acordo com as diferentes condições edafoclimáticas que lhes são oferecidas, podendo o ambiente ser propício ao pleno desenvolvimento da cultura ou lhe causando algum estresse ambiental (LUCIANO et al., 2018).

De acordo com Bergamaschi et al. (1998), IV's representam uma técnica amplamente utilizada, na área do SR, por indicarem a presença e condições da vegetação monitorada, os quais, em geral, têm relação direta com a quantidade de biomassa, IAF, cobertura do solo, interceptação da radiação e rendimento agrícola. Estes índices têm diferentes finalidades como: monitorar o desenvolvimento de biomassa da cultura; normalizar efeitos externos do ambiente como as interferências atmosféricas; suavizar efeitos internos como variações abaixo do dossel da planta e, principalmente, fornecem medidas quantitativas que indicam o vigor da vegetação (GITELSON et al., 2002).

Tabela 8: Principais índices de vegetação disponíveis na literatura.

Índice de Vegetação	Fórmula	Referência
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$NDVI = (NIR-R)/(NIR+R)$	Rouse et al. (1974)
Perpendicular vegetation index (PVI)	$PVI = (NIR-aR-b)/(a^2+1)^{1/2}$	Richardson et al. (1977)
Soil adjusted vegetation index (SAVI)	$SAVI = (NIR-R)/(NIR+R+L)(1+L)$	Huete (1988)
Weighted difference vegetation index (WDVI)	$WDVI = NIR-aR$	Clevers (1989)
Transformed soil adjusted vegetation index (TSAVI)	$TSAVI = a(NIR-aR-b)/(R+a(NIR-b)+X(1+a^2))$	Baret (1993)
Modified soil adjusted vegetation index (MSAVI)	$MSAVI = (2NIR+1-((2NIR+1)^2-8(NIR-R))^{1/2})/2$	Qi et al. 1994
Optimized soil adjusted vegetation index (OSAVI)	$OSAVI = (NIR-R)/(NIR+R+Y)$	Rondeaux et al. 1996)
Generalized soil adjusted vegetation index (GESAVI)	$GESAVI = (NIR-aR-b)/(R+Z)$	Gilabert et al. (2002)
Atmospherically resistant vegetation index (ARVI)	$ARVI = (NIR-RB)/(NIR+RB), RB = R-c(B-R)$	Kaufman et al. (1992)
Modified normalized difference vegetation index (MNDVI)	$MNDVI = NDVI(SWIR_{max}-SWIR)/(SWIR_{max}-SWIR_{min})$	Nemani et al. (1993)
Enhanced vegetation index (EVI)	$EVI=2.5((NIR-R)/(NIR+6R-7.5B+1))$	Huete et al. (2002)
Reduced simple ratio (RSR)	$RSR = SR(SWIR_{max}-SWIR)/(SWIR_{max}-SWIR_{min})$	Brow et al. (2000)

Estes índices são obtidos a partir de imagens de satélite e fornecem uma das melhores formas possíveis de se obter parâmetros biofísicos da vegetação, especialmente em grandes áreas (FRAMPTON et al., 2013). Para Jackson et al. (1983), o IV ideal pode ser definido da seguinte maneira:

"O índice de vegetação deve ser particularmente sensível às coberturas da vegetação, devendo ser insensível ao brilho e cor do solo e pouco afetado pelos efeitos atmosféricos, efeitos ambientais, ângulo de iluminação solar e condições de visualização do sensor".

Os IV's realçam a resposta espectral das plantas e suavizam a influência do solo, com o propósito de distinguir a fenologia da vegetação e as alterações de uso e cobertura da terra ao longo de uma série temporal de imagens (ANTUNES et al., 2015). Muitos estudos vêm sendo feitos para compreender como e quais fatores afetam os resultados desses índices, uma vez que esses se alteram ao longo do tempo, influenciados pelo teor de água presente no solo, tipo de solo, idade da cultura, fertilidade do solo, geometria e estrutura do dossel foliar, espaçamento, entre outros (KAY & ANGERS, 2002).

A variação sazonal da biomassa nas áreas agrícolas influencia a magnitude dos valores dos índices, cujo comportamento se assemelha a uma função senoidal, com altos valores nas épocas de pico vegetativo, e baixos valores nas fases brotação, maturação e logo após a colheita (LUCIANO et al., 2018). A resposta espectral das áreas vegetadas apresenta uma complexa mistura de vegetação, sombra, umidade, brilho e cor do solo. Além disso, o IV é

afetado por variações espaciais e temporais da atmosfera. Mais de quarenta IV's foram desenvolvidos durante as últimas décadas, a fim de melhorar a resposta da vegetação e minimizar os efeitos dos fatores descritos acima (BANNARI et al., 1995). Os primeiros índices foram desenvolvidos por Pearson & Miller (1972), sendo eles o RVI (*Ratio Vegetation Index*) e o VIN (*Vegetation Index Number*), utilizados para estimativa e monitoramento de coberturas vegetais.

Um dos índices de maior utilização atualmente, o NDVI (**Equação 1**), foi proposto por Rouse (1973) e Rouse et al. (1974), sendo bastante utilizado em inúmeras aplicações regionais e globais para monitoramento da vegetação. Segundo Andersson et al. (2010), o NDVI envolve a diferença e a soma entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED). Segundo Bégué et al. (2010), fatores ambientais como tipo de solo, condições climáticas e de manejo são os principais aspectos que influenciam na magnitude dos valores de NDVI na cultura da cana-de-açúcar, uma vez que alteram as propriedades espectrais da área cultivada e, principalmente, influenciam no IAF. Procurando desenvolver índices cada vez mais refinados, foram desenvolvidos índices capazes de captar variações estruturais do dossel das culturas e também sensíveis ao conteúdo de água foliar, como o EVI / EVI2 (*Enhanced Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), respectivamente (JIANG et al., 2008).

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

O EVI (**Equação 2**) foi proposto por Huete et al. (2002), obtido a partir de uma combinação do índice SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) que teve como premissa incorporar um fator de correção do solo (L) ao NDVI, onde L varia de 1 (vegetação rala) a 0 (vegetação densa), juntamente com o índice ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), que utiliza coeficientes de resistência de aerossóis para diminuir a influência atmosférica (FRAMPTON et al., 2013). Este índice foi desenvolvido para evidenciar as regiões com alta biomassa, reduzindo a influência do solo e da atmosfera. Jiang et al. (2008), desenvolveram um índice EVI de 2 bandas (EVI2), onde se retirou a banda do azul, tornando possível sua aplicação em sensores que não possuem tal banda. Em seus estudos, Jiang et al. (2008) demonstraram que as diferenças entre os índices EVI e EVI2, utilizando imagens do sensor MODIS, não foram estatisticamente significativas, com erro

associado ao método de estimativa do EVI2 da ordem de mais ou menos 0,02, permitindo que este índice seja utilizado como uma alternativa ao EVI.

$$EVI = G \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 RED - C_2 BLUE + L} \quad (2)$$

em que:

G é o fator de ganho; L é o fator de ajuste para o solo; C₁ e C₂ são coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis da atmosfera; NIR, RED e BLUE são a reflectância da região espectral do infravermelho próximo, vermelho e azul, respectivamente. Os valores dos coeficientes são: L = 1, C₁ = 6, C₂ = 7,5 e G = 2,5 (JUSTICE et al., 1998).

O EVI é menos propenso a saturação em condições climáticas tropicais, o que o torna mais eficiente em relação ao NDVI. De acordo com Mondal (2011), o EVI tem sido mais efetivo no monitoramento sazonal e interanual de áreas de produção, detectando variações estruturais e de biomassa da vegetação. Duft et al. (2015), constataram que o uso do índice EVI apresentou um melhor desempenho no mapeamento de áreas de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba do que o NDVI. Segundo os autores, isso pode ser explicado pelo problema de saturação do NDVI, que faz com que diversos alvos com respostas espectrais diferentes tenham um comportamento similar, uma vez que a partir de determinado valor é impossível aumentar a magnitude do NDVI, tornando mais difícil a diferenciação dos alvos analisados.

O NDWI, desenvolvido por Gao (1996), é um índice de vegetação altamente correlacionado com o conteúdo de água presente na cobertura vegetal, permitindo monitorar mudanças na biomassa e avaliar o estresse hídrico da vegetação, sendo também pouco sensível aos efeitos da atmosfera. Segundo Szabó et al. (2016), esse índice requer o uso de uma banda situada na região do comprimento de onda do NIR e de uma banda situada no comprimento de onda do infravermelho médio (SWIR).

4.4.2. Principais Aplicações do SR na Cultura da Cana-de-Açúcar

Vários trabalhos utilizando IV's vêm sendo desenvolvidos no âmbito do SR, dedicados, principalmente, às análises de crescimento da cana-de-açúcar ao longo do tempo e na previsão de safra (MOLIJN et al., 2016). A interação da radiação solar com o dossel da cultura, assim como em qualquer outra superfície terrestre, sofre parcial ou totalmente os processos de reflexão, absorção e/ou transmissão (ABDEL-RAHMAN & AHMED, 2008). Em geral, a resposta espectral da planta de cana-de-açúcar depende de cinco fatores principais: arquitetura do dossel, química foliar, aspectos agrônômicos como sanidade e

índice de área foliar, características dos sensores de aquisição de dados e condições atmosféricas (FORTES & DEMATTÊ, 2006).

O comportamento espectral da cana-de-açúcar é bastante relacionado com o índice de área foliar (IAF). Uma variedade com elevado IAF reflete muito mais, comparativamente, do que uma variedade com um IAF médio ou baixo (FORTES & DEMATTÊ, 2006, ABDEL-RAHMAN & AHMED, 2008). Porém, um alto IAF pode reduzir a eficiência fotossintética, uma vez que a radiação solar não atinge, ou atinge parcialmente as folhas fotossinteticamente ativas abaixo do dossel (TEJERA et al., 2007).

A utilização do SR na cultura da cana-de-açúcar também se mostra importante na identificação de diferentes variedades, auxiliando na estimativa de produtividade e avaliação de riscos à cultura (SCHULTZ et al., 2016). A utilização de sensores com alta resolução espacial, como por exemplo, IkonosTM e os sensores da plataforma QuickBirdTM, ainda não foram testados para diferenciação de variedades de cana-de-açúcar. Essa ausência de resultados com sensores de alta resolução espacial se dá principalmente pelo elevado custo de aquisição e por não abranger grandes áreas. A fusão de dados de sensores de resolução espacial alta com a imagem de sensores com resolução hiperespectral elevada podem resultar em um produto novo e útil, fornecendo mais precisão aos estudos de modelagem que envolvem a cultura da cana-de-açúcar (ABDEL-RAHMAN & AHMED, 2008).

Segundo Couto Junior (2007) a cobertura vegetal apresentou uma grande relação com o regime hídrico, podendo ser observadas duas tendências do NDVI da vegetação ao longo do ano, em resposta às duas estações climáticas: seca e úmida. Na passagem de uma estação para outra foram observados padrões intermediários de NDVI, mostrando uma influência da disponibilidade/escassez hídrica da estação anterior. A condição de restrição hídrica faz com que a cultura perca água pelas folhas, ficando ressecada e, conseqüentemente, com um menor NDVI (ANTUNES et al., 2015).

Couto Junior (2007) observou também que, quando as áreas agropecuárias apresentavam grande disponibilidade de água em face do período chuvoso, os IV's aumentavam em razão do ganho de biomassa neste período. Isso se dá por que durante a estação chuvosa tem-se uma maior disponibilidade hídrica para a vegetação, fazendo com que as plantas fiquem mais vigorosas e com uma maior atividade fotossintética, elevando os valores de reflectância.

As séries temporais de IV's, obtidas a partir de imagens de satélite, fornecem informações relevantes acerca de aspectos que caracterizam a dinâmica de crescimento e

desenvolvimento das lavouras, assim como os reflexos do ambiente de produção sobre a resposta produtiva da cultura (BANNARI et al., 2005). Uma vez que os índices de vegetação têm uma alta correlação com parâmetros associados ao desenvolvimento e produtividade das culturas, como densidade de vegetação, biomassa e IAF, a utilização destes índices pode contribuir para o entendimento do desenvolvimento da cana-de-açúcar, uma vez que o índice é uma expressão da biomassa associada ao ambiente em que a cultura está inserida (FERNANDES et al., 2011). A possibilidade de se determinar os ambientes de produção de cana-de-açúcar através de dados espectrais, por meio dos IV's, demonstra o potencial de utilização das tecnologias de SR.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp.* hybrid) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 13, p. 3753–3767, 2008.

ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L.G.; MADERA NETO, J. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W.J. (Ed.). *Solos dos cerrados: tecnologia e estratégia de manejo*. Editora Nobel. p. 33-74, 1985.

ALVES, M. et al. Object based image analysis and data mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. *Remote Sensing of Environment*, v. 123, p. 553–562, 2012.

ANA - Agência Nacional De Águas. *Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada*. Agência Nacional de Águas. Brasília, 2017b.

ANA - Agência Nacional De Águas. *Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil*. Agência Nacional de Águas. Brasília, 2017a.

ANJOS, L. H. C. DOS et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. In: KER, J. et al. (Eds.). *Pedologia: fundamentos*. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 304–343. 2012.

ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. C.; RODRIGUES, L. H. A. Assessing of The Sugarcane Cultivation Dynamics in São Paulo State by Modis Data Temporal Profiles. *Engenharia Agrícola*, v. 4430, n. 6, p. 1127–1136, 2015.

ARRUDA, P. H.; VOURLITIS, F. B.; SANTANNA, O. B.; PINTO JR., F. A.; SOUZA, N. Large net CO₂ loss from a grass-dominated tropical savanna in south-central Brazil in response to seasonal and interannual drought, *J. Geophys. Res. Biogeosci.* v. 121, p. 2110–2124, 2016.

ASGARZADEH H.; MOSADDEGHI M.; DEXTER A. R.; MAHBOUBI A. A.; NEYSHABOURI M. R. Determination of soil available water for plants: Consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, v. 226-227, p. 8-20. 2014.

BANNARI, A. et al. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, v. 13, n. 1-2, p. 95–120, 1995.

BARBALHO, M. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar na região sul do estado de Goiás de 2001 a 2011. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 29, p. 98-110. 2013

BARBOSA, A. D. M. Ambiente de produção na eficiência da conversão de energia solar em cultivares de cana-de-açúcar. UNESP, 2017, 180 p. Tese de doutorado.

BARBOSA, L. C. et al. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 13, p. 15–25, 2018.

BATTIE, P.; LACLAU, J. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. *Field Crops Research*, v. 114, p. 351–360, 2009.

BÉGUÉ, A. et al. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, v. 31, n. 20, p. 5391–5407, 2010.

BELLEZONI, R. A.; SHARMA, D.; VILLELA, A. A.; PEREIRA JUNIOR, A. O. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. *Biomass and Bioenergy*, v. 115, p. 108–119, 2018.

BERTOLANI, F.C.; JOAQUIM, A.C.; DONZELLI, J.L. Sistema de Classificação edafoclimática para a Cultura de Cana-de-açúcar. In: *Sistema de Produção Mecanizada da Cana-de-açúcar Integrada à Produção de Energia e Alimentos*, Brasília, EMBRAPA, 362 p. 2015.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, v. 58, p. 116–127, 2015.

BITTENCOURT, V. C.; CARMELLO, Q. A. C.; BEAUCLAIR, E. G. F.; JOÇO, J.; LEMENTE, J. L. Produtividade da cana-de-açúcar e suas relações com a fertilidade dos solos e o manejo da cultura. *STAB – Açúcar, Álcool & Subprodutos*, v.8, p.10-14, 1990.

BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; DE OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, n. 2, 2018.

BRAUMAN, K. A.; VIART, N. Development of a regionally sensitive water-productivity indicator to identify sustainable practices for sugarcane growers. *Integr. Environ. Assess. Manage*, v. 12, p. 811-820, 2016.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCRACKEN, R. J. *Génesis y clasificación de suelos*. 1. ed. México: Editorial Trilhas, 1981, 417 p.

CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (Ed.). *Produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: FEALQ, p. 31-64, 1993.

CAMPOS, P. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P. R.; EVANGELISTA, A. W. P. Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1139–1149, 2014.

CANASAT. Monitoramento de cana-de-açúcar via imagens de satélite. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

CARDOZO, N. P.; DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; LA SCALA, N. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 204, p. 861–871, 2018.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *Glob Change Biol Bioenergy*, v. 9, p. 1181-1195, 2017.

CARVALHO, L. A. Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo. Universidade de São Paulo, 2002. 86 p. Tese de doutorado.

CASTRO, P. R. C. Fisiologia aplicada à cana-de-açúcar. Piracicaba: STAB, 2016, 208 p.

CASTRO, S. G. Q. DE, FRANCO, H. C. J., & MUTTON, M. Â. Harvest managements and cultural practices in sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, v. 38, n. 1, p. 299–306, 2014.

CAVALCANTE, E. P.; PRADO, H. DO. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de latossolos da região de araxá-mg. *Nucleus*, v. 7, n. 2, p. 115–124, 2010.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. Melhoramento da cana-de-açúcar. 1. ed. Jaguariúna, SP: Embrapa, 2004.

CHAVES, J. B. P.; SILVA, C. A. B.; SILVA, F. C.; CESAR, M. A. A. Produção, qualidade e mercado de açúcar mascavo, melado e rapadura, no Brasil. In: SILVA, F. C. DA; CESAR, M.

A. A.; SILVA, C. A. B. (Eds.). Pequenas indústrias rurais de cana-de-açúcar: melado, rapadura e açúcar mascavo. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 11-20, 2003.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v. 267, p. 156–168, 2016.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Brasília, DF. Companhia nacional de abastecimento, 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/22956_506e8f00170422c62a452d3e319a6d6f >. Acesso em 12 jan. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA- CNI. Instituto Brasileiro do Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Contribuição do setor brasileiro de gás, petróleo e biocombustíveis para o desenvolvimento sustentável no país. [S.l.: s.n.], 2012. 81 p.

COUTO JUNIOR, A. F. Análise temporal da cobertura vegetal e do solo da área do Ecomuseu do Cerrado (Goiás) Através De Imagens Modis E CBERS. Universidade de Brasília, 2007. 61 p. Tese de Doutorado.

CRESPO-MENDES, N. et al. Relationships between plant species richness and soil pH at the level of biome and ecoregion in Brazil. *Ecological Indicators*, v. 98, p. 266–275, 2019.

DALLEMAND, J. F.; HILBERT, J. A.; MONFORTI, F. Bioenergy and Latin America: A Multi-Country Perspective. Scientific and Technical Research series, 2015, 190 p.

DE FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA, N. JR. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agric Ecosyst Environ*, v. 141, p. 77–85, 2011.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. DE; LANDELL, M. G. DE A. (Eds.). Cana-de-açúcar. 1. ed. Campinas, SP: Editora IAC, p. 47–56, 2008.

DONZELLI, J. L. Centro de Tecnologia Canavieira. 2007. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/downloads/soloeambiente_donzelli.pdf>. Acesso em 05 dez. 2018.

DONZELLI, J. L.; BERTOLANI, F. C.; TROMBETA, N. DE CAMPOS. Sugarcane Cultivation: Soil Mapping, Environmental Effects, and New Sugarcane Varieties. In: CHANDEL, A. K.; SILVEIRA, MARCOS H. L. (Eds.). *Advances in Sugarcane Biorefinery*. Elsevier, 2018, 318 p.

DUFT, D. G. et al. Comparação do desempenho de índices de vegetação do sensor MODIS para mapeamento sistemático da cana-de-açúcar. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa - PB. Anais, p. 2727-2734, 2015.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.

FACHINELLI, N. P.; PEREIRA, A. O. Impacts of sugarcane ethanol production in the Paranaíba basin water resources. *Biomass and Bioenergy*, v. 83, p. 8–16, 2015.

FAO. The future of food and agriculture: trends and challenges. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. *Scientia Agrícola*, v. 68, n. 2, p. 139–146, 2011.

FERNADES, R. A. S.; SANTOS, C. M. Competitividade das exportações sucroalcooleiras do Estado de São Paulo. *Revista de política agrícola*, Brasília, v. 20, n. 4, 2011.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento Remoto da vegetação: evolução e estado da arte. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, Maringá, 2008.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: DE JONG VAN LIER, Q (Ed.). *Física do Solo*. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-27, 2010.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agronômico no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. Cana-de-Açúcar. Instituto Agronômico de Campinas. 1ª Reimpressão, p. 31-44, 2010.

FILOSO, S.; DO CARMO, J. B.; MARDEGAN, S. F.; LINS, S. R. M.; GOMES, T. F.; MARTINELLI, L. A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 1847–1856, 2015.

FORMOSO, M. L. L.; MELFI, ADOLFO; CERRI, C. C.; FRITSCH, E. Tropical Soils: Genesis, Distribution And Degradation of Lateritic Pedological Systems. In: FORMOSO, M. L. L.; CERRI, C. C. (Eds.). *Workshop on Tropical Soils*. 1. Ed. Rio De Janeiro: Academia Brasileira De Ciências, p. 9–30, 1999.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J. A. M. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 9, p. 1395–1412, 2006.

FRAMPTON, W. J. et al. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 82, p. 83–92, 2013.

GAO, B. C. NDWI- A Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, p.257- 266, 1996.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, v.80, n. 1, p.76-87, 2002.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. *Journal of Soil Science*, v. 34, p. 405-428, 1983.

GRECCHI, R. C.; GWYN, Q. H. J.; BÉNIÉ, G. B.; FORMAGGIO, A. R.; FAHL, F. C. Land Use and Land Cover Changes in The Brazilian Cerrado: A Multidisciplinary Approach to Assess the Impacts of Agricultural Expansion. *Applied Geography*, v. 55, p. 300–312, 2014.

GUARENGHI, M. M.; WALTER, A. Assessing Potential Impacts of Sugarcane Production on Water Resources: A Case Study in Brazil. *Biofuels, Bioproducts And Biorefining*, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2016.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating Soil Water Retention Characteristics from Particle Size Distribution, Organic Matter Percent, and Bulk Density. *Water Resources Research*, v. 15, n. 6, p. 1633–1635, 1979.

HANSEN, M. C.; LOVELAND, T. R. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. V. 122, p. 66-74, 2012.

HERNANDES, T. A.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. E. A. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2016.

HILLEL, D. *Environmental soil physics*. 5. ed. United States of America: Academic Press, 2002b, 771 p.

HILLEL, D. Particle sizes and specific surface. In: HILLEL, D. (Ed.). *Environmental soil physics*. 5. ed. United States of America: Academic Press, p. 59–74, 2002a.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERRERIA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 195–213, 2002.

HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. *Remote Sensing of Environment*, v. 17, p. 37-53, 1985.

HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHRÖDER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. *Ecohydrology*, v. 1180, n. 11, p. 1154–1180, 2015.

IBGE. Mapa de biomas do Brasil. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>. Acesso em: 11 dez. 2018.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*, v. 92, p. 185–202, 2005.

JACKSON, R. D.; SLATER, P. N.; PINTER, P. J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*, v. 13p. 187-208, 1983.

JIANG, Z. et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 10, p. 3833–3845, 2008.

JOAQUIM, A. C.; BELLINASSO, I. F.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. C.; BARATA, M. Q. F. Potencial e manejo de solos cultivado com cana-de-açúcar. In: Seminário Copersucar de tecnologia agrônômica. Piracicaba. Anais. São Paulo: Copersucar, p. 1-9, 1994.

JOAQUIM, A. C.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. C.; SARTO, L. F. Potencial de produção de cana-de-açúcar. In: Seminário copersucar de tecnologia agrônômica. Piracicaba. Anais. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, p. 68-76, 1997.

JUNIOR, P. R. DE S. et al. Phosphorus fertilization in sugarcane cultivation under different soil managements. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 10, p. 665–669, 2017.

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*, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Soil structure. In: WARRICK, A. W. Soil physics companion. Boca Raton: CRC Press, cap. 7, p. 249-296, 2002.

KOLLN, O. T.; GAVA, G. J. C.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; URIBE, R. A. M.; PANNUTI, L. E. R. Fertigated Sugarcane Yield and Carbon Isotope Discrimination (D13C) Related to Nitrogen Nutrition. Sugar Tech, v. 18, n. 4, p. 391–400, 2016.

LADÁNYI, Z. S.; BLANKA, V.; MEYER, B.; MEZŐSI, G.; RAKONCZAI, J. Multi-indicator sensitivity analysis of climate change effects on landscapes in the Kiskunság National Park, Hungary. Ecological Indicators, v. 58, p.8-20, 2015.

LANDELL, M.G.A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A.C.M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA, M.A.; XAVIER, M.A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. Scientia Agricola, v. 60, p. 741-745, 2003.

LEÃO, T.P.; GUIMARÃES, T.L.B.; FIGUEIREDO, C.C.; BUSATO, J.G.; BREYER, H.S. On critical coagulation concentration theory and grain size analysis of Oxisols. Soil Science Society of America Journal, v. 77, p. 1955-1964, 2013.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. Remote sensing and image interpretation. New York: John Wiley & sons, 2000, 724p.

LIU, J. et al. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. Field Crops Research, v. 196, p. 418–425, 2016.

LOPES, M. A.; FALEIRO, F. G.; FERREIRA, M. E.; LOPES, D. B.; VIVIAN, R.; BOITEUX, L. S. Embrapa contribution to the development of new plant varieties and their impact on Brazilian agriculture. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 2, p. 31–46, 2012.

LUCIANO, A. C. S. et al. Remote Sensing of Environment Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil. Remote Sensing of Environment, v. 215, p. 438–451, 2018.

MACHADO, R. S. et al. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MANZATTO, C. V. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil: seleção de terras potenciais para a expansão do seu cultivo. Rio de Janeiro, v. 1, 2008, 7 p.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; & PEREIRA, S. E. M. Zoneamento Agroecológico da Cana-de Açúcar: Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Embrapa Solos, 2009, 55 p.

MARIN, F. R.; CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo , Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 2, p. 149–156, 2012.

MARIN, F. R.; MARTHA, G. B.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P. Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. *BioScience*, v. 66, p. 307-316, 2016.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agrícola*, v. 58, n. 2, p. 295–301, 2001.

MOLIJN, R. A. et al. Sugarcane Growth Monitoring Through Spatial Cluster and Temporal Trend Analysis Of Radar and Optical Remote Sensing Images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, v. 2, p. 7141–7144, 2016.

MONDAL, P. Quantifying surface gradients with a 2-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). *Ecological Indicators*, v. 11, n. 3, p. 918–924, 2011.

NETO, J. R. et al. The Arrangement and Spacing of Sugarcane Planting Influence Root Distribution and Crop Yield. *Bioenergy Research*, v. 11, p. 291–304, 2018.

OLIVEIRA-FILHO A.; RATTER J. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado biome. In the Cerrados of Brazil. Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna, Oliviera PS, Marquis TJ (eds). Columbia University Press: New York, p. 91–120, 2002.

PÁDUA JUNIOR, A. L. Fatores edáficos de Latossolos férricos na produtividade de cana-de-açúcar na região sul de Goiás. Universidade de Brasília, 2016, 118 p. Tese de Doutorado.

PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment II, p. 1355-1379, 1972.

PEREIRA, M. G; CAMACHO, C. F; FREITAS, M. A. V; DA SILVA, N. F. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, 2012.

PINA, J.; BONO, J.; OLIVEIRA, A. S.; RUFINO, R.; AMORIM, D. Organic residues on rooting and yield of sugarcane in Typic Quartzipsamments soil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, p. 650-655, 2015.

PRADO, H. Pedologia Fácil. Aplicações em solos tropicais. 3ª ed. Piracicaba, 2011, 118 p.

PRADO, H. Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais. 4. ed. Piracicaba, 2013, 284 p.

PRADO, H. Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais. 5. ed. Piracicaba, 2016, 271 p.

PRADO, H.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETTO, R.; CAMPANA, M.P.; ZIMBACK, L.; SILVA, M.A. Relation between chemical sub surface conditions of subsoils and sugarcane yield. In: World soil science congress, Montpellier, v.1, 1998, 232 p.

PRADO, H.; VAN LIER, Q. J.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Classes de disponibilidade de água e o volume de água disponível (1 m-3) para três níveis de evapotranspiração potencial. Disponível em: <http://www.pedologiafacil.com.br/artig_4.php> Acesso em: dez. 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORREA, G. F. Pedology: Basis for Environmental Distinction (Pedologia: base para distinção de ambientes). NEPUT, Viçosa, 1995, 304 p.

RODRIGUES, T. R.; VOURLITIS, G. L.; LOBO, F. A.; OLIVEIRA, R. G.; NOGUEIRA, J. S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south-central Mato Grosso, Brazil. *J. Geophysics Biogeoscience*, 2014.

RODRIGUES, T. R.; VOURLITIS, G. L.; LOBO, F. A.; SANTANNA, F. B.; DE ARRUDA, P. H. Z.; NOGUEIRA, J. S. Modeling canopy conductance under contrasting seasonal conditions for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, p. 218–229, 2016.

ROUSE, J. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFCT Type II Report, Greenbelt, MD, USA. 1973.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. W.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT Type III Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1974.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166, p. 113–24, 2010.

SANO, E. E.; ROSA, R.; LUÍS, J.; BRITO, S.; FERREIRA, G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do bioma Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 1, p. 153–156, 2008.

SANTOS, M. H. M. C. A expansão canavieira em Goiás e seus reflexos: exemplo de Santa Helena de Goiás. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, 1987, 174 p. Dissertação de mestrado.

SCHULTZ, B. et al. Classificação orientada a objetos em imagens multitemporais landsat aplicada na identificação de cana-de-açúcar e soja. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 68, p. 131–143, 2016.

SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 521–528, 2018.

SILVA, J. F.; FARINAS, M. R.; FELFILI, J. M.; KLINK, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. *Journal of Biogeography*, v. 33, p. 536–548, 2006.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; IORI, P.; DE MELO SILVA, F. A.; FOLLE, S. M.; FRANZ, C. A. B.; DE SOUZA, Z. M. Prediction of soil shear strength in agricultural and natural environments of the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 1, p. 82–91, 2015.

SILVA, R. P.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; PEDROSA, E. M. R.; TAVARES, U. E.; SANTOS, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil and Tillage Research*, v. 181, n. 3, p. 1–10, 2018.

SIMÕES, M. DOS S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. *XI simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, Anais*: p. 2367–2374, 2003.

SOUZA, R. C.; MENDES, I. C.; REIS-JUNIOR, F. B.; CARVALHO, F. M.; NOGUEIRA, M. A.; TEREZA, A.; HUNGRIA, M. Shifts in taxonomic and functional microbial diversity with agriculture: How fragile is the Brazilian Cerrado? *BMC Microbiology*, p.1–15, 2016.

SPOSITO, G.; FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. DE. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agrícola*, v. 58, n. 3, p. 627–646, 2001.

SZABÓ, S.; GÁCSI, Z.; BALÁZS, B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Landscape & Environment*, v. 10, n. 3-4, p. 194–202, 2016.

TAHERZADEH, E.; SHAFRI, H.Z.M.: Development of a Generic Model for the Detection of Roof Materials Based on an Object-Based Approach Using WorldView-2 Satellite Imagery. *Advances in Remote Sensing*, v. 2, p. 312-321, 2013.

TEJERA, N. A.; RODE´S, R.; ORTEGA, E. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. *Field Crops Research*, v. 102, p. 67–72, 2007.

VAN LIER, Q. J. Disponibilidade de água às plantas. In: DE JONG VAN LIER, Q. (Ed.). *Física do Solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 283-298, 2010.

VARGA, Z.; CZEDLI, H.; KEZI, C.; LÓKI, J.; FEKETE, Á.; BIRO, J. Evaluating the Accuracy of Orthophotos and Satellite Images in the Context of Road Centerlines in Test Sites in Hungary. *Research Journal of Applied Sciences*, v. 10, p. 568-573, 2015.

VITTI, A. C.; PRADO, H. Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e disponibilidade hídrica. *Pesquisa e Tecnologia*, v. 9, n. 2, p. 9, 2012.

WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J.; ESCOBAR, D. E.; GERBERMANN, A. H. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, p. 105-119, 1991.

ZHAO, D. et al. Quantification of soil aggregate microstructure on abandoned cropland during vegetative succession using synchrotron radiation-based micro-computed tomography. *Soil & Tillage Research*, v. 165, p. 239–246, 2016.

ZHAO, P.; JACKSON, P. A.; BASNAYAKE, J.; LIU, J.; CHEN, X., ZHAO, J.; XIA, H. Genetic variation in sugarcane for leaf functional traits and relationships with cane yield, in environments with varying water stress. *Field Crops Research*, v. 213, n. 5, p. 143–153, 2017.

CAPÍTULO ÚNICO

UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Felipe Cardoso de Oliveira Maia¹; Tairone Paiva Leão²; Vinícius Bof Bufon³

¹Aluno de mestrado em sistemas de produção agrícola sustentáveis da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – FAV-UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Instituto Central de Ciências Ala Sul, Brasília, DF, felipe2cardoso@gmail.com.

²Professor Associado da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – FAV-UnB.

³Pesquisador da EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados

RESUMO

A migração dos cultivos de cana-de-açúcar do bioma Mata Atlântica para o Cerrado trouxe grandes desafios ao manejo da cultura. A compreensão das características edafoclimáticas de uma determinada região e suas interações são essenciais para caracterização dos ambientes de produção e adoção de estratégias de manejo apropriadas. A demanda elevada de mão de obra e recursos financeiros para definição dos ambientes, por meio de amostragem convencional do solo, é fator limitante ao seu emprego. Por isso, é necessário buscar alternativas para facilitar a caracterização de novas áreas como, por exemplo, o sensoriamento remoto. O objetivo deste estudo foi avaliar os índices de vegetação NDVI e EVI2 na discriminação de ambientes de produção de cana-de-açúcar. Avaliou-se ainda a idade da cultura e período climático mais adequado para máxima diferença dos índices de vegetação entre os ambientes de produção. O trabalho foi realizado por meio da análise dos ambientes de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista, Quirinópolis - GO. Foram utilizados dados históricos de produtividade dos anos agrícolas 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018. Para a composição dos índices de vegetação NDVI e EVI2 foram utilizadas 14 imagens do satélite Sentinel-2A. Os índices foram calculados para cada uma das imagens e comparados ao ambiente de produção já mapeado pela usina. O NDVI não apresentou relação com os ambientes de produção. O EVI2 foi capaz de distinguir a biomassa entre diferentes ambientes de produção. As maiores diferenças nos valores médios de EVI2 e, portanto, os melhores parâmetros para discriminação dos ambientes de produção de cana-de-açúcar, foram obtidos nos canaviais com idades entre 180 e 240 dias e no período climático chuvoso.

Palavras-chave: Zonas de manejo, sensoriamento remoto, EVI, NDVI.

USE OF VEGETATION INDEXES FOR IDENTIFICATION ENVIRONMENTS OF PRODUCTION FOR SUGARCANE

Felipe Cardoso de Oliveira Maia¹; Tairone Paiva Leão²; Vinícius Bof Bufon³

ABSTRACT

The migration of sugarcane production from the Mata Atlântica biome to the Cerrado brought great challenges to crop management. The understanding of the edaphoclimatic characteristics of a given region and its interactions are essential for the production environment and the adoption of proper crop management strategies. Elevated financial and labor demand for the production environment characterization are limiting its adoption. Therefore, searching alternatives for production environment characterization, such as remote sensing, is necessary. The objective of this study was to evaluate the use of NDVI and EVI2 vegetation indexes in discriminating environments of sugarcane production. The work was carried out through the analysis of sugarcane production environments located in the municipality of Quirinópolis - GO. We used historical data of three years (2015/2017, 2016/2017 and 2017/2018) of agricultural production and for the composition of vegetation indexes, 14 images of the Sentinel-2A satellite were used. The indexes were calculated for each of the images and assigned to the production environments from a vector layer (shapefile). NDVI was not related to production environments. EVI2 was able to measure differences in biomass production between production environments. The greatest differences in the mean values of EVI2 among the production environments were verified in the combination of areas with ages between 180 and 240 days and rainy season.

Keywords: Management areas, remote sensing, EVI, NDVI.

1. INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado (Savana neotropical) cobre aproximadamente 25% do território brasileiro e é o segundo maior bioma da América do Sul (SANO et al., 2010; HUNKE et al., 2015; ARRUDA et al., 2016). O Cerrado foi por muito tempo considerado como sendo impróprio para a agricultura por conta dos seus solos quimicamente pobres. No entanto, com as correções químicas apropriadas, esses solos passaram a ser bastante produtivos, e desde meados da década de 1970, grandes áreas foram incorporadas à agricultura, de tal maneira que, hoje, a região representa a principal área produtora de grãos do país (SOUZA et al., 2016). Avanços tecnológicos, estudos agronômicos, incentivos governamentais e as características favoráveis a mecanização agrícola, aliados aos baixos preços das terras, também contribuíram para a transformação deste bioma em uma das regiões mais produtivas do Brasil (GOEDERT, 1983; GRECCHI et al., 2014).

Historicamente, a expansão da cana-de-açúcar se deu principalmente sobre áreas de pastagens degradadas (CHERUBIN, 2016), e a maior parte dos cultivos de cana-de-açúcar se concentrava na região Sudeste, especialmente sobre áreas de Mata Atlântica no estado de São Paulo. No entanto, nas últimas duas décadas, a produção de cana-de-açúcar se expandiu para a região do Cerrado, inclusive de São Paulo (FILOSO, 2015; BELLEZONI et al., 2018).

Atualmente, o Brasil é o país com a maior produção de cana-de-açúcar, representando cerca de 39% da produção mundial (SILALERTRUKSA & GHEEWALA, 2018; SILVA et al., 2018). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), a produção estimada para o ano-safra 2018/2019 é de 635,51 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, e a estimativa de área colhida está em 8,66 milhões de hectares, onde a região Centro-Sul responde por aproximadamente 75% dessa produção (587,47 milhões de toneladas), liderada pelos estados de São Paulo, Goiás e Minas Gerais.

Os conhecimentos sobre os tipos de solos, clima e demais particularidades do manejo da cana-de-açúcar contribuem para o aumento da eficiência tecnológica direcionada ao alcance de maiores produções com o mínimo de áreas e insumos necessários (MANZATTO et al., 2009). Por esta razão, a interação das condições de solo com as condições climáticas são elementos chave na definição de "zonas de manejo homogêneo". No que diz respeito às condições de solo importam a textura, a profundidade, a disponibilidade hídrica e a fertilidade. E no que diz respeito às condições climáticas importam a precipitação (oferta hídrica), a evapotranspiração (demanda hídrica) e, conseqüentemente, o balanço entre oferta e demanda, chamado déficit hídrico. Com base nas condições de solo e climáticas delimita-se as

zonas de manejo estimando-se o potencial produtivo da cultura. Estas zonas, também chamadas de unidades de gestão diferenciada, são denominadas no setor sucroenergético de "ambientes de produção" (PRADO, 2013). A definição desses ambientes proporciona a adoção de estratégias de manejo que reúnem áreas mais homogêneas e a alocação correta das variedades de cana-de-açúcar, explorando-se o máximo potencial produtivo da cultura e, conseqüentemente, reduzindo os custos operacionais e aumentando a longevidade do canavial (CAVALCANTE & PRADO, 2010).

Um dos grandes desafios na definição desses ambientes está na prospecção e caracterização de extensas áreas. Atualmente essas prospecções são realizadas por meio de amostragem convencional do solo (superfície e subsuperfície), demandando tempo e elevando os custos com mão de obra especializada. Outra questão é a caracterização de ambientes em áreas pouco acessíveis devido a aspectos limitantes da topografia e vegetação densa, tornando pouco precisa a caracterização dos ambientes nessas áreas. Frequentemente, mapas de solos em escalas inadequadas têm sido utilizados para derivar ambientes de produção, resultando em falhas na alocação e desempenho de variedades, manejo e classificação desses ambientes (DONZELLI & BERTOLANI, 2018). A classificação e mapeamento dos ambientes de produção é fundamental para se aplicar o manejo agrônômico adequado e se atingir níveis elevados de eficiência de uso de água e produtividade. Contudo, por serem intensos em demanda de mão-de-obra e recursos financeiros, justifica-se buscar alternativas e ferramentas para facilitar e agilizar a caracterização de novas áreas, o que pode ser obtido a partir da utilização do sensoriamento remoto.

As imagens de satélite se tornaram ferramentas essenciais para monitoramento da vegetação, fornecendo informações de maneira rápida, especialmente em áreas que são pouco acessíveis a pesquisas de campo (VARGA et al., 2015). Com o desenvolvimento das aplicações do sensoriamento remoto para estudo da vegetação, diferentes índices de vegetação (IV's) foram propostos para avaliá-las, quantitativa e qualitativamente, através do uso de dados multiespectrais (SZABÓ et al., 2016). De acordo com Bergamaschi et al. (1998), IV's são bastante utilizados por indicarem as condições da vegetação, os quais, em geral, têm relação direta com a quantidade de biomassa, índice de área foliar (IAF), cobertura do solo, vigor da vegetação e rendimento agrícola (GITELSON et al., 2002).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) tem sido um dos mais utilizados, uma vez que requer para o seu cálculo somente as bandas do infravermelho próximo (*Near Infrared* - NIR) e do vermelho (RED) (ANDERSSON et al., 2010), porém, é mais propenso a

saturação em condições climáticas tropicais, o que pode torna-lo pouco eficiente. Outros índices foram desenvolvidos com o objetivo de captar variações estruturais no dossel das culturas e também estimar o conteúdo de água foliar, como o EVI (*Enhanced Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), respectivamente (JIANG et al., 2008). Estes índices permitem evidenciar padrões da vegetação que se mostram diretamente relacionados às dinâmicas sazonais dos ambientes em que estão inseridos (DUFT et al., 2015). De acordo com Mondal (2011), o EVI tem sido bastante efetivo no monitoramento sazonal e interanual de áreas de produção, detectando variações estruturais e de biomassa da vegetação.

Neste trabalho, estabeleceu-se a premissa básica de que diferentes ambientes de produção e, conseqüentemente, diferentes aportes de nutrientes e água resultarão em diferentes taxas de crescimento e acúmulo de biomassa na cultura da cana-de-açúcar, e pelo fato dos índices de vegetação serem capazes de mensurar diferenças da produção de biomassa, também poderão ser utilizados como ferramentas na identificação destes diferentes ambientes. O objetivo desse estudo foi avaliar a utilização dos índices de vegetação NDVI e EVI2 na discriminação de ambientes de produção de cana-de-açúcar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área de Estudo

O trabalho foi realizado por meio de análise dos dados históricos das áreas de produção de cana-de-açúcar da Usina Boa Vista (UBV), localizada no município de Quirinópolis - GO, cujas áreas de produção se estendem à região de Sudoeste de Goiás, conforme a **Figura 4**.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical úmido - Aw, com duas estações bem definidas e variações anuais quanto à umidade, temperatura e pluviosidade, com chuvas de verão (outubro a abril) e inverno seco (maio a setembro). De acordo com os postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), as precipitações regionais variam de 1.500 a 1.750 mm/ano. A temperatura média anual está em torno de 25,7°C, concentrando os maiores valores no mês de outubro, com 31,1°C, e os menores valores nos meses de julho, com 19,8°C (CIIAGRO, 2019). As áreas de produção estão localizadas na bacia hidrográfica do Rio Paraná, principalmente em relevo mais aplainado (**Figura 5**) em três grupos geomorfológicos distintos (SRAIIB, SRAIIIB e SRAIVB). A maior parte dessas áreas está sobre a Superfície Regional de Aplainamento III-B (SRAIIIB), que ocorre na região sudoeste de Goiás na bacia sedimentar do Paraná, com cotas

entre 550 e 750 m. A SRAIIB apresenta um caráter relativamente irregular e secciona principalmente os basaltos da Formação Serra Geral (Grupo São Bento) e Formação Adamantina (Grupo Bauru), predominando os relevos tabulares e relevos com ondulações suaves e dissecação fraca (SIEG, 2018). Quanto aos tipos de solo são observados Latossolos Vermelho Eutroférico, Vermelho e Vermelho-Amarelo, ocupando a maior parte da região, Argissolos, Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos, nas porções topográficas mais elevadas.

Na **Figura 5**, as porções mais altas do terreno são representadas pelas tonalidades avermelhadas, e as áreas mais planas e menos declivosas pela coloração azul.

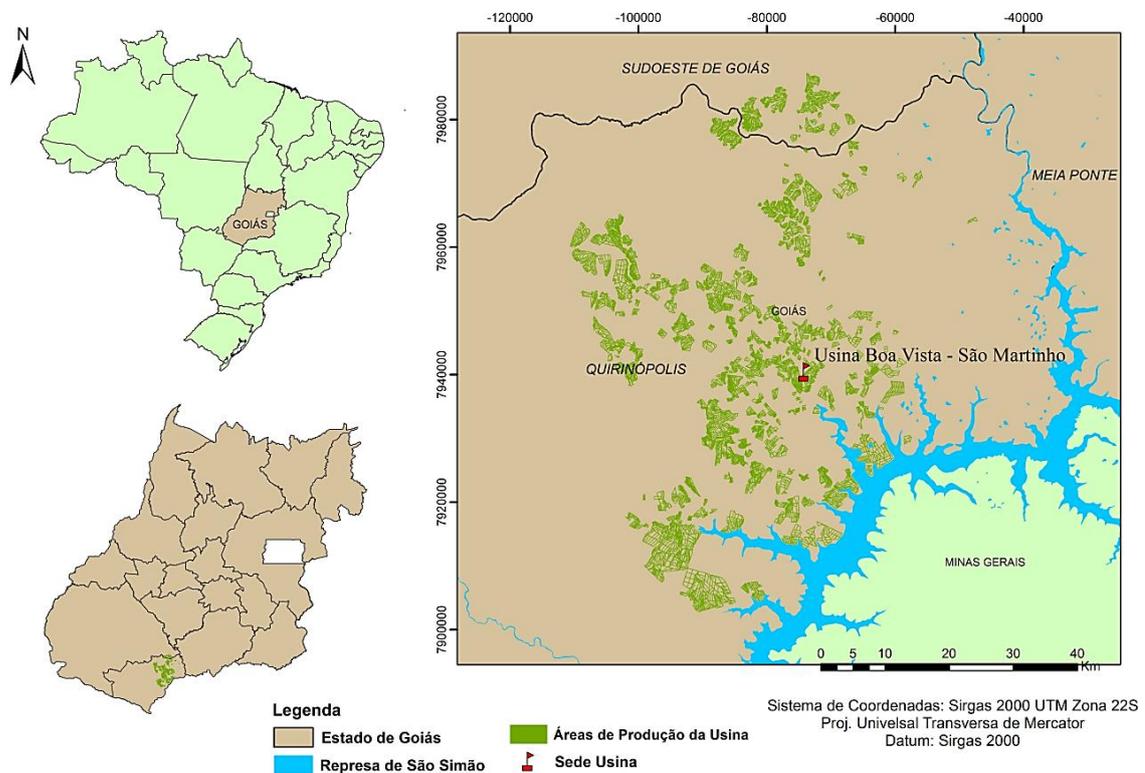


Figura 4. Localização das áreas de produção da Usina Boa Vista.

2.1.1. Manejo e Coleta de Dados das Áreas de Produção

A classificação e o mapeamento dos ambientes de produção de cana-de-açúcar (**Figura 6**) utilizam os atributos da camada subsuperficial do solo (80 a 100cm), por isso, acabam não capturando os efeitos dos manejos executados sobre a área e, conseqüentemente, as reais condições de solo disponíveis na camada arável, sobretudo quanto aos aspectos da fertilidade.

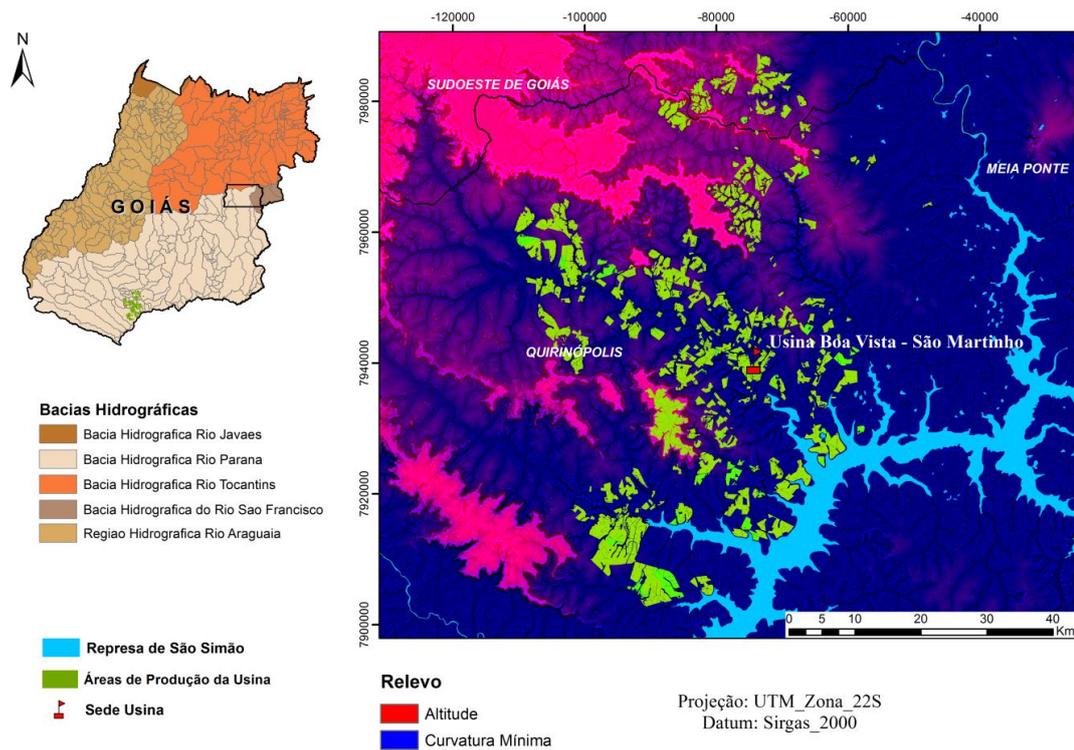


Figura 5. Bacia hidrográfica e relevo da área de estudo.

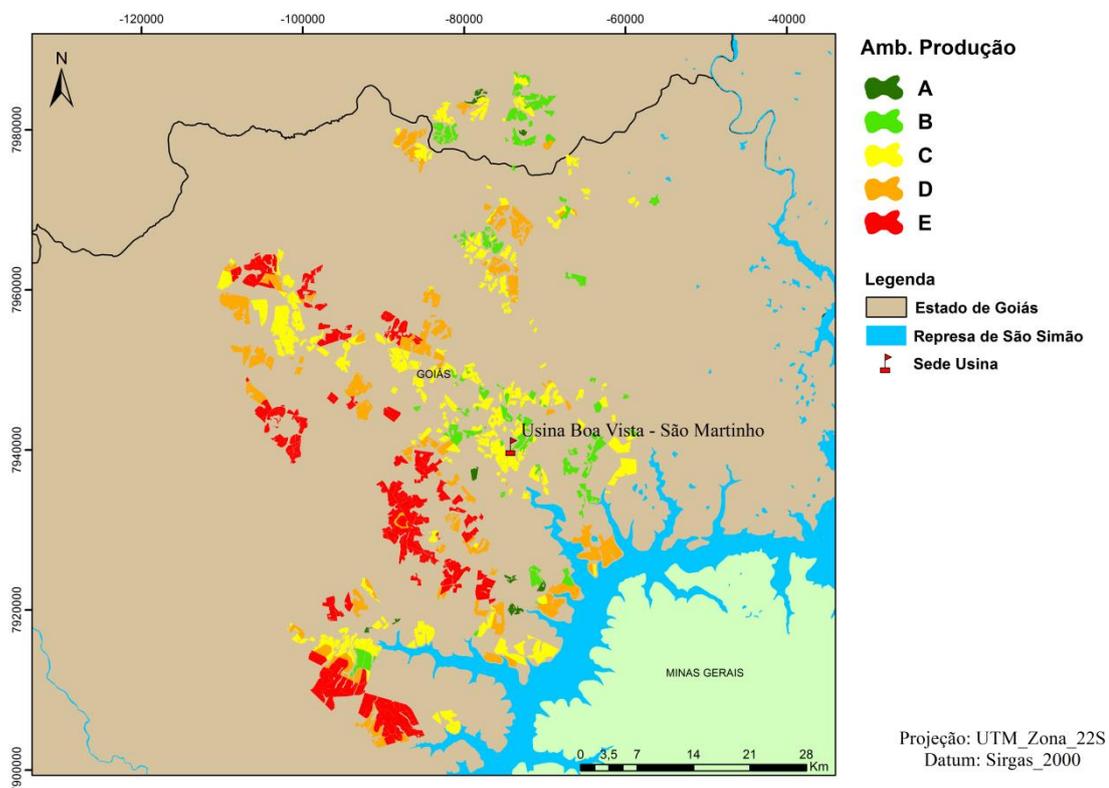


Figura 6. Ambientes de produção de cana-de-açúcar da área de estudo.

O manejo da fertilidade do solo é realizado durante as operações de plantio, onde são aplicadas formulações com uréia ((NH₂)₂CO), fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl), obedecendo a recomendação de adubação obtida por meio das análises de fertilidade do solo. Aplica-se anualmente nas soqueiras, por meio de adubação de cobertura, formulações a base de nitrato de amônio (NH₄NO₃) e cloreto de potássio (KCl). Já na reforma dos canaviais são realizadas operações de subsolagem, seguida de gradagem pesada e incorporação de calcário dolomítico e gesso. Nas áreas que possuem solos com baixa capacidade de retenção de água, é realizada no período de estiagem a irrigação de salvamento com vinhaça, para a rebrota da cana-de-açúcar.

Quanto às épocas de plantio e colheita, a cana é plantada no período de janeiro a abril, sendo a cana planta (primeiro corte) colhida no intervalo de tempo de 14 a 18 meses, com cortes consecutivos de aproximadamente 12 meses em relação a colheita anterior. As colheitas são realizadas em três momentos distintos, de acordo com Landell e Bressiani (2010): colheita de outono (01 de abril a 21 de junho); colheita de inverno (22 de junho a 21 de setembro) e colheita de primavera (22 de setembro a 30 de novembro).

2.1.2. Dados Históricos da Área de Estudo

Conicionados à concordância com as cláusulas de sigilo e propriedade intelectual presentes no contrato de parceria técnico-científica estabelecida entre a Embrapa Cerrados e o Grupo São Martinho (controlador da usina), os arquivos contendo os dados históricos e vetoriais (*shapefiles*) das áreas de produção foram fornecidos pela Embrapa Cerrados e pela UBV, correspondentes aos anos safra de 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018.

Foram fornecidos também dados de solos contendo a caracterização físico-química das áreas de produção, os quais foram utilizados inicialmente para a classificação dos ambientes de produção por parte da usina. Estes dados são provenientes de levantamentos pedológicos realizados na UBV, onde foram coletadas amostras deformadas (coletadas por meio de gradagem) nas profundidades de 0-25; 25-50 e 80-100 cm, anteriormente a este estudo, totalizando 2.628 pontos de amostragem. O conhecimento dos atributos químicos, físicos e morfológicos desses horizontes é fundamental para a definição das classes de solo e para o estudo dos ambientes de produção de cana-de-açúcar, pois é a parte do volume do solo que será explorado pelo sistema radicular da cultura, especialmente nos ciclos de crescimento da cana de segundo corte em diante (LANDELL et al., 2003). O mapa de solos foi elaborado pelo Centro de Tecnologia Canavieira em escala detalhada (1:20.000).

Visando unificar a base de dados e possibilitar análises, foi realizada a junção das bases de dados contendo as informações produtivas (mês de plantio e colheita) com as informações sobre as classes de solo e ambientes de produção. O procedimento foi realizado no software ArcGis® (ESRI, 2014), na sua versão 10.2.2, por meio da ferramenta *Spatial Join*, que une os atributos com base na sua localização, o que foi possível uma vez que todas as informações estavam georreferenciadas. Essa nova camada de informações foi utilizada então como base para os processamentos subsequentes.

A **Figura 7** apresenta a distribuição dos pontos de amostragem realizados pela usina para a caracterização dos ambientes de produção e os seus respectivos talhões.

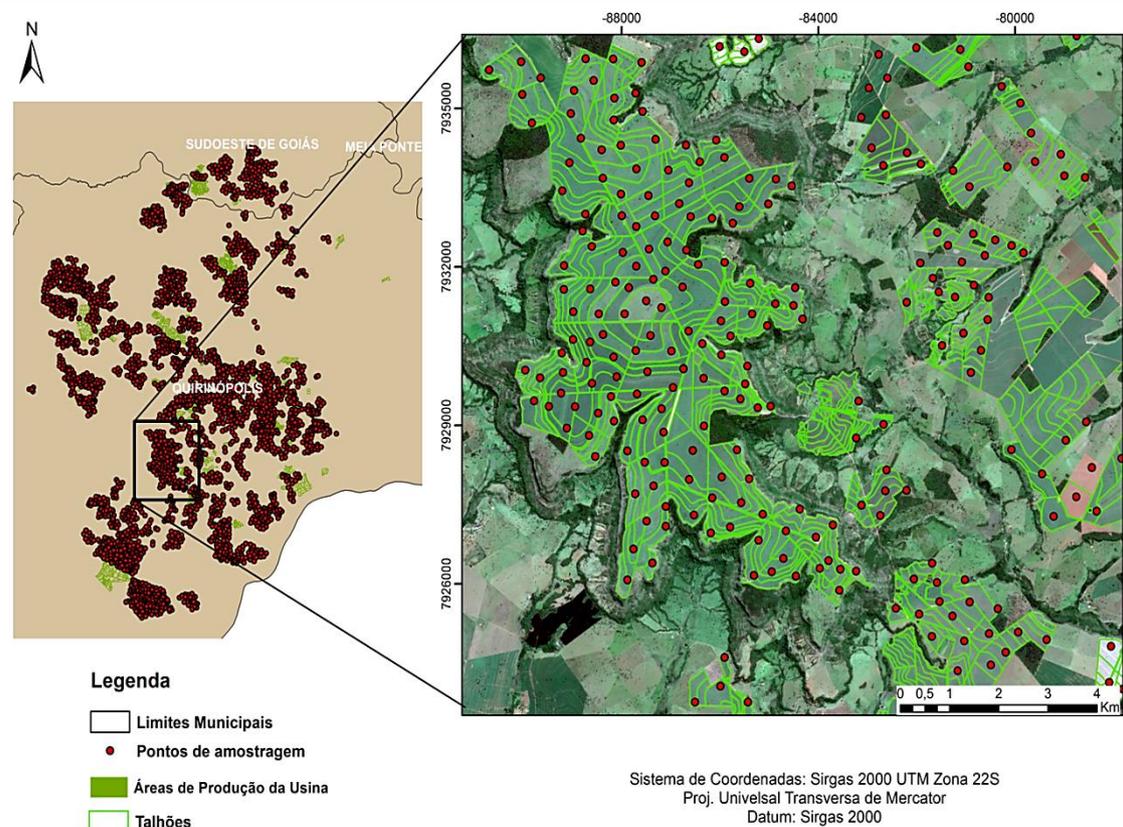


Figura 7. Pontos de amostragem de solo realizadas pela usina nas áreas de produção.

2.2. Organização e Processamento dos Dados

2.2.1. Aquisição das Imagens do Satélite Sentinel-2A

O satélite Sentinel-2A foi lançado em 2015 pela Agência Espacial Europeia (ESA, 2017). Este satélite dispõe de um sensor MSI (*Mult Spectral Instrument*) e possui um campo de visada de 290 km, com capacidade de revisita de cinco dias na linha do equador (VAN DER MEER et al., 2014). A órbita tem sincronia com o sol a 786 km de altitude (DRUSH et

al., 2012). O satélite tem ainda 13 bandas com resolução radiométrica de 12 bits, sendo quatro delas com 10 metros de resolução espacial, seis com 20 metros e três com 60 metros, de acordo com a **Figura 8**.

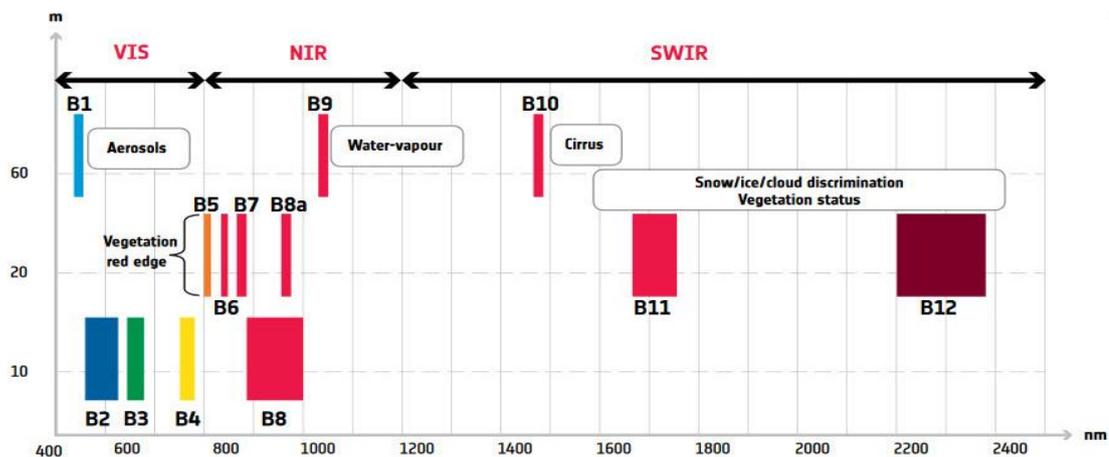


Figura 8. Resolução espacial (m) e espectral (nm) do satélite Sentinel-2A (ESA, 2017).

As imagens foram adquiridas a partir da plataforma eletrônica Earth Explorer, página da United States Geological Survey - USGS (ESTADOS UNIDOS, 2017). As imagens obtidas por meio desta página possuem processamento no nível 1C, ou seja, os dados fornecidos são ortorretificados e convertidos para reflectância no topo da atmosfera (ESA, 2017). Para a composição dos índices de vegetação NDVI e EVI2, foram adquiridas imagens correspondentes as bandas 4 (Red) e 8 (NIR). Foram coletadas todas as imagens disponíveis dentro do período de análise (2015 a 2017), visando serem representativas das diferentes épocas sazonais (período chuvoso, transição chuva/seca, seca e transição seca/chuva), totalizando 14 imagens, de acordo com a **Tabela 9**. Ressalta-se que nas áreas de estudo não houve cobertura de nuvens e que uma única cena (imagem) cobria toda a área, não sendo necessária a junção (composição) de várias imagens.

2.2.2. Índices de Vegetação

Após a aquisição das imagens, foram calculados os Índices de vegetação NDVI e EVI2 no software ArcGis® versão 10.2.2 (ESRI, 2014). Para o cálculo do NDVI foi utilizado o algoritmo desenvolvido por Rouse et al. (1974), conforme a **Equação 3**:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

O índice EVI2 foi calculado segundo a metodologia descrita por Jiang et al. (2008), segundo a **Equação 4**:

$$EVI2 = 2,5 \frac{NIR-RED}{NIR+2,4 RED+1} \quad (4)$$

Em que:

2,5 e 2,4 são fatores de ajuste do processo de calibração.

Tabela 9. Data de aquisição das imagens.

Imagem	Data	Período
1	03/02/2016	Chuvoso
2	03/04/2016	Transição Chuva/Seca
3	12/07/2016	Seco
4	01/08/2016	Seco
5	30/09/2016	Seco
6	09/03/2017	Chuvoso
7	18/04/2017	Transição Chuva/Seca
8	28/05/2017	Transição Chuva/Seca
9	17/06/2017	Transição Chuva/Seca
10	02/07/2017	Seco
11	07/07/2017	Seco
12	05/09/2017	Seco
13	15/10/2017	Transição Seca/Chuva
14	18/01/2018	Chuvoso

2.2.3. Atribuição dos Índices aos Ambientes de Produção

Foram realizadas as extrações dos valores dos índices de vegetação para a camada vetorial (*shapefile*), ou seja, em cada talhão (classificados segundo os ambientes de produção de A até E) foi realizada a extração do valor médio do índice de vegetação. O procedimento foi realizado por meio da ferramenta *Zonal (Spatial Analyst)* presente no software ArcGis® versão 10.2.2 (ESRI, 2014). Essa ferramenta tem a função de coletar informações de células de um *raster* subjacente e adicioná-la como um novo campo à camada (*shape*) especificada. Este recurso fornece ainda um resumo estatístico descritivo (contagem, mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão) destas áreas. Desta maneira, foi possível obter para cada ambiente de produção um respectivo valor médio do índice de vegetação para uma determinada imagem correspondente. O fluxograma com as operações de processamento adotado neste estudo é apresentado no **Anexo A**.

2.2.4. Janelas de Idade da Cultura e Períodos Climáticos Analisados

Para este trabalho, avaliou-se os índices de vegetação do canavial considerando as áreas com idade da cultura entre 180 a 240 dias, 240 a 305 dias e 150 a 305 dias. Estes recortes foram realizados a partir das épocas de colheita das áreas de produção presentes no banco de dados fornecido pela usina. Para exemplificar, na imagem adquirida em 05/09/2017, foram selecionadas apenas as áreas que haviam sido colhidas entre novembro/2016 e abril/2017, onde a cultura estaria, na data de aquisição da imagem, com idade entre 150 e 305 dias. Para se verificar qual o momento climático mais adequado na distinção dos ambientes de produção por meio dos índices, os dados também foram avaliados segundo os seguintes períodos: chuvoso, transição chuva/seca e seca.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma geral, na produção de cana-de-açúcar, os ambientes de produção, classificados de "A" (menos restritivos) até "E" (mais restritivos), são manejados visando melhorar o potencial produtivo das áreas consideradas mais limitantes. Nos ambientes mais restritivos adota-se manejo diferenciado de correção da fertilidade do solo, irrigação de salvamento e alocação de variedades mais tolerantes ao estresse hídrico. Ambientes menos restritivos são manejadas de modo a assegurar o potencial produtivo já existente nessas áreas.

Outro aspecto importante do manejo dos ambientes de produção é o planejamento de colheita. Prioriza-se colher no início da safra (abril a junho), quando ainda resta alguma umidade no solo proveniente da estação chuvosa, as áreas com menor capacidade de retenção de água. Com isso, eleva-se a probabilidade de disponibilidade hídrica mínima para brotação do canavial para o próximo ciclo. Nos meses consequentes, à medida que se intensifica a estação seca e o déficit hídrico, colhem-se as áreas com maior capacidade de retenção de água, novamente, visando favorecer a brotação do canavial para o próximo ciclo.

Estas ações de manejo supracitadas implicam em redução da diferença do potencial produtivo original (antes das intervenções de manejo entre os ambientes de produção). Este fato traz um desafio para a discretização dos ambientes de produção a partir dos índices de vegetação, haja vista que a produção da biomassa observada ocorre após intervenções de manejo. Destaca-se que essas práticas de manejo não alteram a classificação inicial dos ambientes de produção, uma vez que estes são definidos com base em atributos físico-químicos e morfológicos dos horizontes de subsuperfície, que são menos sensíveis às alterações ocasionadas pelo manejo (LANDELL et al., 2003).

Os ambientes de produção menos favoráveis ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, ambientes "D" e "E", apresentam solos com baixa disponibilidade hídrica, como Cambissolos Háplicos e Neossolos Quartzarênicos, que causam maiores estresses fisiológicos na cultura, induzindo a uma maior redução da área foliar e diminuição do acúmulo de biomassa (LUCIANO et al., 2018), o que é agravado pelos longos períodos de estiagem na região do Cerrado, aumentando o déficit hídrico do solo e ocasionando alta demanda de água por parte da planta (RODRIGUES et al., 2016). Já os ambientes de produção mais favoráveis, "A" e "B", estão em áreas que incluem a presença de Latossolos Vermelhos textura muito argilosa e Nitossolos, ambos eutróficos e Argissolos. Estes solos, segundo Prado et al. (2016) apresentam uma maior capacidade de armazenamento de água e boa fertilidade, quando manejados corretamente, o que permite evitar o estresse da cultura por um período de tempo maior.

Apesar do esforço em minimizar a diferença de potencial de produção de biomassa entre os ambientes de produção, fruto do manejo agrônomico, verificou-se que a produtividade média (TCH – Toneladas de Colmo por Hectare) decresceu de acordo com as classes de solo (**Tabela 9**), analisadas a partir do banco de dados fornecido pela usina. Esses dados corroboram com os resultados encontrados por Landell et al. (2003), que verificaram que a produtividade da cana-de-açúcar decresceu significativamente de acordo com a textura e condições químicas do horizonte subsuperficial de várias classes de solo na seguinte ordem: eutrófico > distrófico > álico > ácrico.

Tabela 10. Produtividade média (TCH) de acordo com as classes de solo do banco de dados analisado.

Classe de solo	TCH
Argissolo Vermelho-Amarelo	90
Latossolo Vermelho	71
Latossolo Vermelho-Amarelo	70
Latossolo Amarelo	61
Cambissolo Háplico	56
Neossolo Quartzarênico	51

Em um estudo desenvolvido por Prado et al. (2011) em Piracicaba – SP, em dois solos semelhantes na textura e diferentes na química e morfologia (Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Nitossolo Vermelho (NV), ambos com textura muito argilosa e horizonte A moderado, foi constatado que houve um ganho de produtividade de 15 Mg ha⁻¹ para o NVe

em relação ao LVd. Os autores, atribuíram essa diferença à maior disponibilidade de água e nutrientes no Nitossolo, especialmente o cálcio e baixo teor de alumínio. Em relação a morfologia do solo, os mesmos constataram que o Horizonte B do Nitossolo apresentava estrutura do tipo prismático e subangular, ao contrário do Latossolo que apresentava estrutura granular. Essa diferença na estrutura, faz com que a drenagem da água seja mais acentuada no Latossolo, reduzindo a disponibilidade de água e ocorrendo o ressecamento mais rapidamente (VITTI & PRADO, 2012; BARBOSA, 2017).

Foi analisada ainda a produtividade média dos ambientes de produção colhidos em início de safra, colheita de outono (01 de abril a 21 de junho), para os três anos agrícolas em análise (2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018), conforme apresentado na **Tabela 10**. Semelhantemente ao observado para as classes de solo, a despeito do efeito de manejo reduzindo as diferenças entre os ambientes de produção, observou-se que o ambiente de produção “A” apresentou a maior média de produtividade, 106 Mg ha⁻¹, decrescendo gradualmente até o ambiente “E”, que apresentou uma produtividade média de 75 Mg ha⁻¹, corroborando com os resultados encontrados por Bertolani et al. (2015).

Tabela 11. Produtividade média (TCH) e desvio padrão para os ambientes de produção analisados.

Amb. Produção	TCH
A	113 ± 14
B	81 ± 5
C	76 ± 14
D	75 ± 12
E	66 ± 13

Os índices de vegetação, por terem relação direta com a biomassa, índice de área foliar e cobertura do solo, se alteram ao longo do tempo influenciados pela fenologia e desenvolvimento da cultura, que é variável de acordo com a idade, teor de água presente no solo, tipo de solo, fertilidade, estrutura do dossel foliar e condições climáticas (KAY & ANGERS, 2002; ANTUNES et al., 2015).

A **Figura 9** exemplifica os índices de vegetação NDVI e EVI2 para a imagem referente à 03/04/2016, onde em cada talhão (classificados segundo os ambientes de produção de A até E) foi realizada a extração do valor médio do índice de vegetação segundo a metodologia descrita acima. Observa-se que, em uma mesma área, o EVI2 é mais sensível as variações de biomassa do que o NDVI e que em áreas com maior quantidade de biomassa o

NDVI tende a se uniformizar (saturar), dificultando a discretização da biomassa entre os ambientes. Em comparação com o EVI2, o NDVI também é mais susceptível às interferências atmosféricas, condições de solo exposto ou pouca vegetação (HENRIQUE et al., 2015), verificado na **Figura 9** pela presença de valores negativos maiores ou próximos a zero.

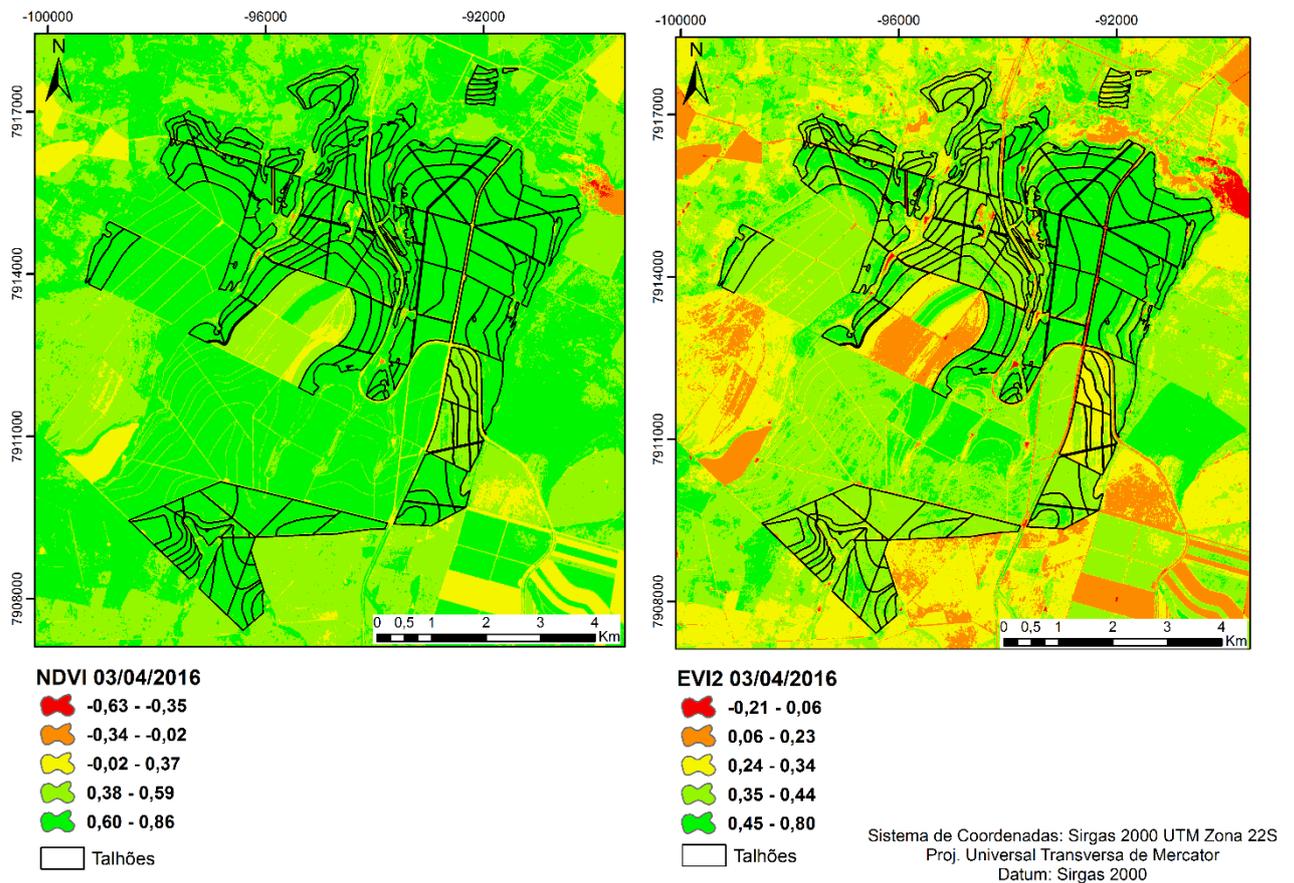


Figura 9. Índices de vegetação NDVI e EVI2 para a imagem de 03/04/2016.

Os resultados referentes ao índice de vegetação NDVI não apresentaram relação com os ambientes de produção analisados neste trabalho. Para ilustrar essa ausência de relação, na **Tabela 11** é apresentada a estatística descritiva (média, desvio padrão, máximos e mínimos) do NDVI para as áreas com idade da cultura entre 180 e 240 dias. Observou-se que o NDVI apresentou desvios padrões relativamente altos e presença de valores próximos a zero (valores de mínimo) e, em alguns casos, até negativos, demonstrando a maior susceptibilidade deste índice à possíveis áreas de solo exposto (decorrentes de falha da cultura no campo) ou com pouca vegetação. Sendo assim, diante da ausência de relação entre o índice supracitado e os ambientes de produção, apresentou-se neste trabalho somente a discussão dos dados referentes ao índice de vegetação EVI2.

Tabela 12. Estatística descritiva do índice de vegetação NDVI para os ambientes de produção das áreas com idade entre 180 e 240 dias.

Amb. Produção	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Período Chuvoso				
A	0.46	0.20	0.06	0.76
B	0.59	0.19	-0.08	0.84
C	0.51	0.21	-0.08	0.81
D	0.58	0.13	0.06	0.81
E	0.53	0.16	-0.07	0.83
Período de Transição				
A	0.58	0.15	0.10	0.76
B	0.64	0.11	0.06	0.80
C	0.57	0.17	-0.01	0.81
D	0.59	0.15	0.06	0.82
E	0.60	0.13	0.00	0.81
Período de Seca				
A	0.15	0.15	0.13	0.69
B	0.11	0.11	0.09	0.74
C	0.13	0.13	0.05	0.75
D	0.10	0.10	0.08	0.75
E	0.11	0.11	0.06	0.75

Vários autores têm demonstrado que os índices EVI e EVI2 têm sido mais efetivos na detecção e monitoramento de variações de biomassa da vegetação (MONDAL, 2011; DUFT et al., 2015; HENRIQUE et al., 2015). Este fato também foi observado neste trabalho com cana-de-açúcar, especialmente pela alta produção de biomassa, o que geralmente causa a saturação do NDVI e torna mais difícil a diferenciação dos alvos analisados. O NDVI pode saturar-se em condições de vegetação densa, isto é, tornar-se insensível a altos valores de índice de área foliar, ocasionando uma subestimação da biomassa ou mostrando uma resposta constante (GU et al., 2013). Duft et al. (2015) corroboram com os resultados deste trabalho ao identificar que o EVI apresentou melhor desempenho no mapeamento de áreas de cana-de-açúcar do que o NDVI, especialmente em condições climáticas tropicais, sendo também mais sensível a variações de biomassa moderada a densa. Em comparação ao NDVI, o EVI2 também reduz as interferências de fundo de solo e perturbações atmosféricas (SHEN et al., 2014).

O EVI2 calculado para os ambientes de produção a partir das imagens analisadas, inicialmente segundo os períodos de idade da cultura avaliados de 180 a 240 dias, 240 a 305 dias e 150 a 305 dias, são apresentados nas **Figuras 10, 11 e 12**.

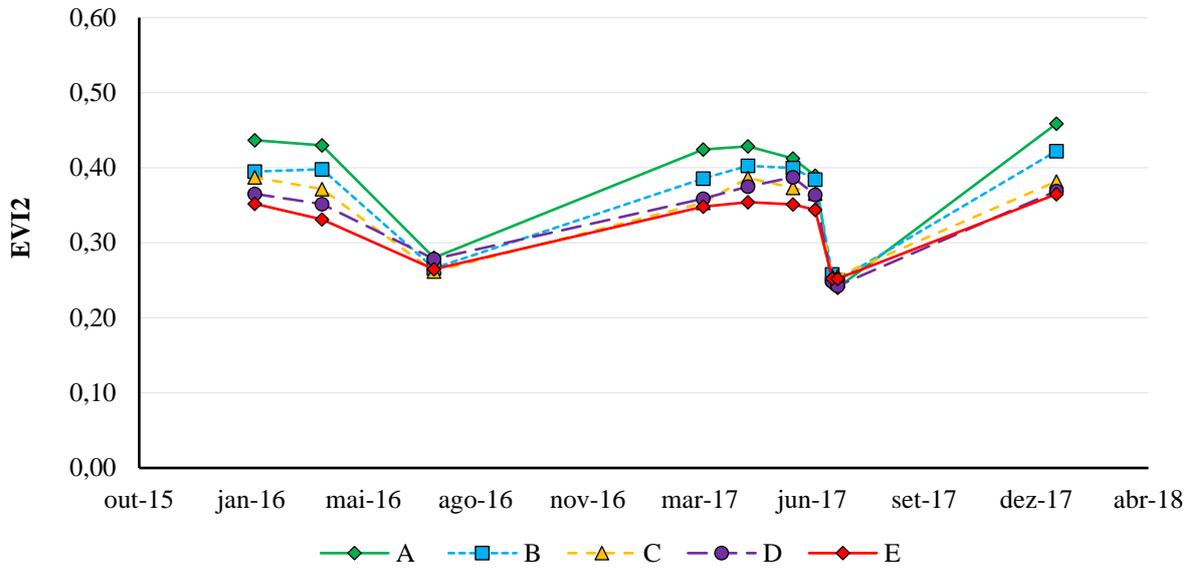


Figura 10. Média do EVI2 ao longo do tempo para cada ambiente de produção com idade entre 180 e 240 dias.

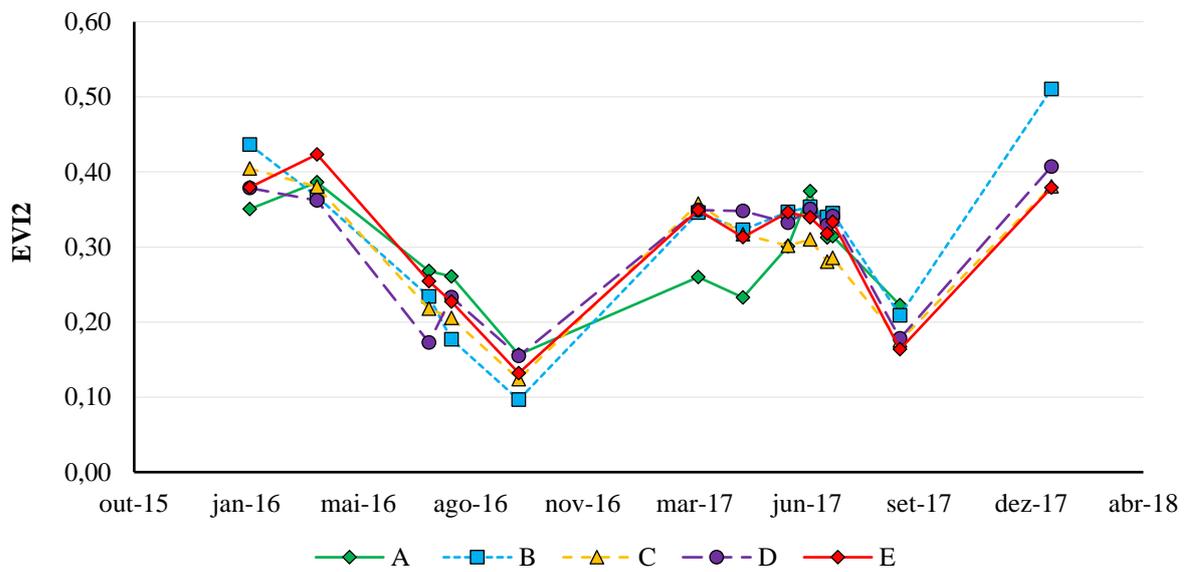


Figura 11. Média do EVI2 ao longo do tempo para cada ambiente de produção com idade entre 240 e 305 dias.

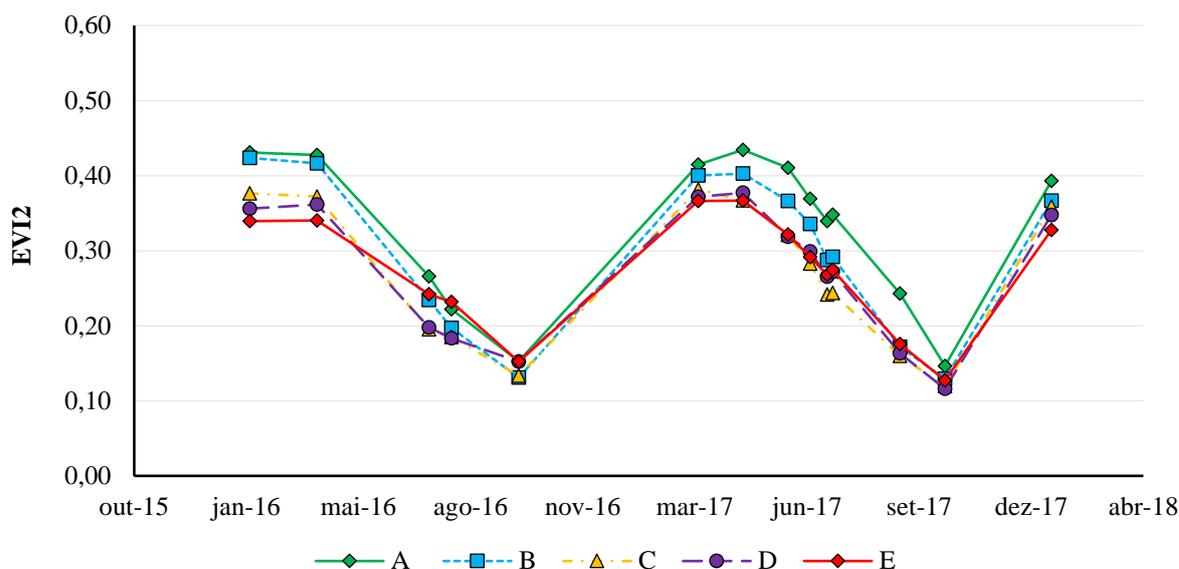


Figura 12. Média do EVI2 ao longo do tempo para cada ambiente de produção com idade entre 150 e 305 dias.

A evolução temporal do índice de vegetação reflete o padrão de crescimento da cultura da cana-de-açúcar nas áreas avaliadas. Os ambientes de produção analisados mostram uma baixa atividade da vegetação no período entre os meses de abril e outubro, período em que grande parte das áreas entram em fase de maturação (senescência) e posterior colheita. O período que apresentou maior índice de vegetação (dezembro a abril) coincide com o período de desenvolvimento vegetativo mais intenso da cultura e também com a época das chuvas na região do Cerrado brasileiro, corroborando com os resultados encontrados por Hunke et al. (2015). A maior disponibilidade hídrica, além da maior disponibilidade de radiação e temperatura, favorece o desenvolvimento e acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, maiores valores de EVI2, conforme corrobora resultados de Guarenghi & Walter (2016). A variação sazonal da biomassa em áreas agrícolas influencia na magnitude dos índices de vegetação, cujo comportamento se assemelha a uma função senoidal, com altos valores nas épocas de pico vegetativo e baixos valores nas fases de brotação, maturação e logo após a colheita (LUCIANO et al., 2018).

A quantidade de biomassa e, portanto, o índice de vegetação, é influenciado pelo nível de desenvolvimento da cultura, que é função também de sua idade. Desta forma, canaviais em idades diferentes, mesmo que no mesmo ambiente de produção, apresentam índice de vegetação diferente. O EVI2 médio anual das áreas de produção com idade entre 180 e 240 dias apresentou maiores valores quando comparado com os períodos de 240 a 305 dias e 150 a 305 dias, sendo esta a melhor janela para se discriminar os ambientes, conforme apresentado

na **Tabela 13**. Isso se deve ao fato da menor diferença de idade entre as áreas (aproximadamente 60 dias), quando comparado com as áreas de idade entre 150 e 305 dias, por exemplo, onde essa diferença pode chegar a 200 dias. Essa maior diferença de idade da cultura causa a mistura espectral de áreas mais novas, onde se tem a cana-de-açúcar em fase inicial de desenvolvimento vegetativo mais intenso, com áreas mais velhas (cultura entrando em fase de maturação), contribuindo para que a média do índice de vegetação seja menor nesses períodos mais esparsos (LU et al., 2015). A estimativa do índice de vegetação pode sofrer maior influência da reflectância do solo enquanto o canavial é ainda jovem e não cobriu integralmente a superfície do solo (BORÉM & SANTOS, 2016). Por outro lado, canaviais mais velhos, ou com grande biomassa podem, por influência de chuva, vento, ou mesmo do próprio peso, sofrer acamamento. Este acamamento também pode causar ruídos na assinatura espectral da área avaliada uma vez que o que é observado pelo satélite não são somente as folhas fotossinteticamente ativas, mas também colmo e palha, afetando a magnitude dos índices, como corroborado por Maule et al. (2001).

Tabela 13. Média e desvio padrão do EVI2 para os períodos de idade da cultura.

Amb. Produção	EVI2
180 - 240 dias	
A	0.3745 ± 0.11
B	0.3562 ± 0.10
C	0.3392 ± 0.11
D	0.3340 ± 0.09
E	0.3215 ± 0.09
240 - 305 dias	
A	0.2865 ± 0.10
B	0.3140 ± 0.10
C	0.2876 ± 0.10
D	0.3027 ± 0.08
E	0.3044 ± 0.09
150 - 305 dias	
A	0.3284 ± 0.13
B	0.2968 ± 0.12
C	0.2670 ± 0.11
D	0.2702 ± 0.11
E	0.2732 ± 0.11

Semelhantemente aos resultados encontrados por Couto Junior (2007), os índices de vegetação expressados pelos ambientes de produção também indicaram relação com os períodos climáticos analisados. As condições de temperatura e precipitação afetam a dinâmica de crescimento da vegetação e, conseqüentemente, as medidas espectrais associadas,

conforme também apontado por Shen et al. (2014). As **Figuras 13 a 15** apresentam a média do EVI2 para os ambientes de produção (A até E) de cana-de-açúcar segundo a idade da cultura e o período climático correspondente (chuvoso, transição chuva/seca e seca).

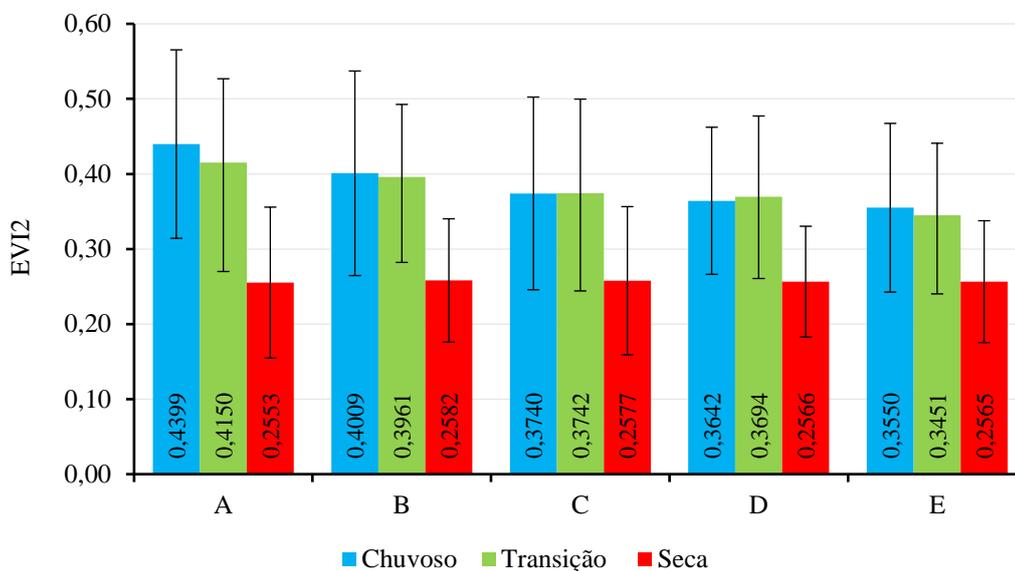


Figura 13. Média do EVI2 para os ambientes de produção referente às áreas com idade entre 180 e 240 dias.

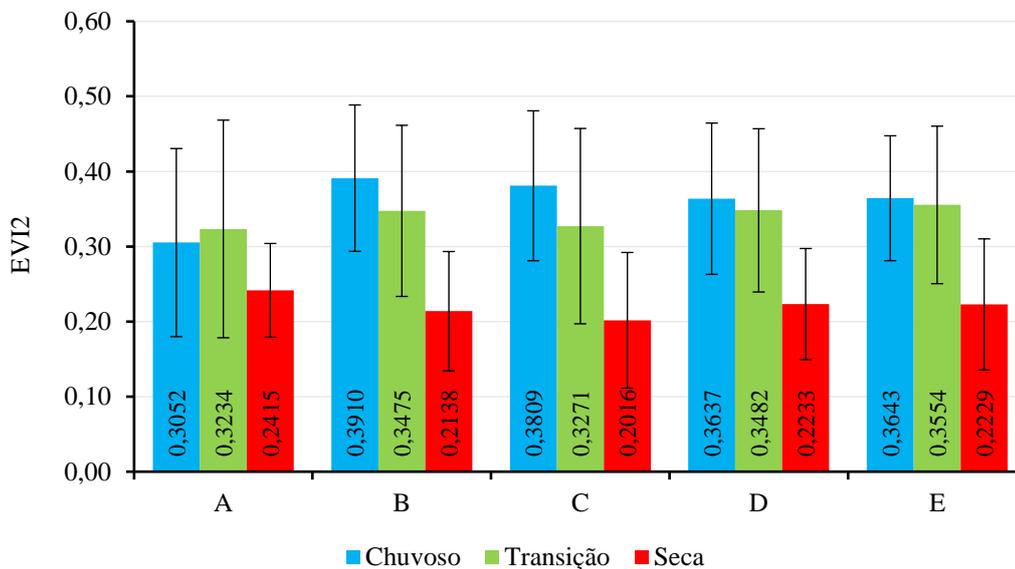


Figura 14. Média do EVI2 para os ambientes de produção referente às áreas com idade entre 240 e 305 dias.

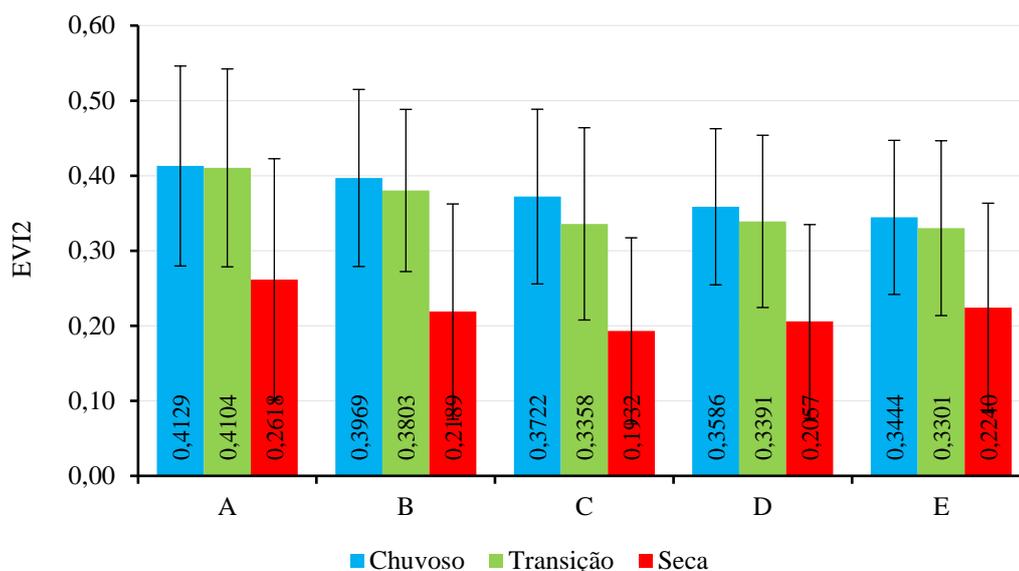


Figura 15. Média do EVI2 para os ambientes de produção referente às áreas com idade entre 150 e 305 dias.

De acordo com os resultados apresentados, as maiores diferenças de EVI2 também foram verificadas para os ambientes de produção com idade entre 180 e 240 dias, onde esta janela se mostrou mais eficiente na distinção dos ambientes de produção, de modo que os valores do índice decaíram gradualmente dos ambientes menos restritivos (ambiente A) para os ambientes mais restritivos (ambiente E), tendo também as maiores diferenças e menores desvios padrões associados.

O período climático chuvoso (novembro a março) apresentou os maiores valores médios de EVI2 para os ambientes de produção, assim como as maiores diferenças entre os ambientes, quando comparados com os períodos de transição (abril a junho) e estação de seca (julho a setembro) do Cerrado brasileiro. Verificou-se também que no período de seca a diferença do índice de vegetação entre os ambientes de produção foi menor, o que pode ser explicado pelo déficit hídrico intenso nessa época. Este déficit hídrico é tão intenso (VIEIRA et al., 2019) que, mesmo a capacidade de armazenamento superior dos ambientes de produção menos restritivos não é suficiente para sustentar a demanda hídrica de sua maior biomassa por muito tempo. Consequentemente, após longo período de seca, os canaviais se nivelam em termos de biomassa, reduzindo a diferença no índice de vegetação entre os ambientes de produção mais e menos favoráveis. Outro fator que contribui para reduzir a diferença do índice de vegetação entre os ambientes de produção pode estar relacionado às épocas de colheita, em função das atividades de manejo e planejamento da usina, onde são colhidos os

canaviais que estão em piores ambientes no início de safra e os que estão em ambientes menos restritivos no final de safra.

Mesmo com as interferências provenientes dos manejos aplicados sobre os ambientes de produção, verificou-se o decréscimo do índice de vegetação no sentido dos ambientes mais restritivos. Isso pode ser justificado também pelo fato de que, apesar do nivelamento dos ambientes quanto à fertilidade do solo na camada arável, pouco pode ser feito para alterar as propriedades físicas, textura e estrutura do solo em profundidade (> 80 cm), conforme relatado por Horne & Scotter (2016) e Zhao et al. (2016), uma vez que essas propriedades controlam em grande parte a retenção e armazenamento de água dos solos inseridos nesses ambientes. Contudo, mesmo com um desvio padrão associado relativamente alto, percebe-se uma tendência de relação entre o EVI2 e o ambiente de produção, com decréscimo do índice a medida que se move para os piores ambientes.

A principal aplicação da ideia proposta nesse trabalho é a identificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar em áreas de expansão (vegetação nativa, pastagem e grãos). Novos estudos poderão ser realizados analisando-se o comportamento espectral das vegetações em áreas onde existam imagens disponíveis do momento anterior ao cultivo da cana-de-açúcar, principalmente em áreas de pastagem que tradicionalmente recebem pouca intervenção de manejo, ou em áreas de vegetação nativa (mata, cerrado), eliminando os erros associados às intervenções antrópicas e, possivelmente, permitindo uma melhor discretização dos ambientes. A ampliação do número de anos agrícolas e do número de imagens analisadas também pode ser buscada visando aprimorar o método e fornecer maiores certezas quanto aos valores mais prováveis dos índices para diferenciar estes ambientes.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados referentes ao índice de vegetação NDVI não apresentaram relações com os ambientes de produção analisados neste trabalho. O índice de vegetação EVI2 foi capaz de mensurar diferenças na produção de biomassa entre os ambientes de produção de cana-de-açúcar, podendo ser utilizado como ferramenta auxiliar na identificação desses ambientes.

As áreas de produção com idade entre 180 e 240 dias apresentam maiores valores de EVI2 quando comparado com os períodos de 240 a 305 dias e 150 a 305 dias, tendo também as maiores diferenças e menores desvios padrões associados.

O período climático chuvoso apresentou os maiores valores médios de EVI2 para os ambientes de produção, quando comparados com os períodos de transição e estação de seca no Cerrado brasileiro.

As maiores diferenças nos valores médios de índice de vegetação e, portanto, a melhor estratégia encontrada para discriminação dos ambientes de produção de cana-de-açúcar por sensoriamento remoto, é utilizar o EVI2 em canavial com idade entre 180 e 240 dias no período climático chuvoso.

O Brasil é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com aproximadamente 10,2 milhões de hectares cultivados e com potencial de expansão para 65 milhões de hectares, ou seja, o setor sucroenergético tem a possibilidade de aumentar em aproximadamente seis vezes a quantidade de áreas cultivadas atualmente (MANZATTO et al., 2009). Sendo assim, este trabalho apresenta metodologias para o desenvolvimento de estratégias que visam aprimorar o processo de definição dos ambientes de produção de cana-de-açúcar com base nas ferramentas de sensoriamento remoto, buscando alternativas e ferramentas para facilitar e agilizar a caracterização de novas áreas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil. Agência Nacional de Águas. Brasília, 2017.

ALVES, M. et al. Object Based Image Analysis and Data Mining applied to a remotely sensed Landsat time-series to map sugarcane over large areas. *Remote Sensing of Environment*, v. 123, p. 553–562, 2012.

ANTUNES, J. F. G.; LAMPARELLI, R. A. C.; RODRIGUES, L. H. A. Assessing Of The Sugarcane Cultivation Dynamics In São Paulo State By Modis Data Temporal Profiles. *Engenharia Agrícola*, v. 4430, n. 6, p. 1127–1136, 2015.

ARRUDA, P. H. G. L.; VOURLITIS, F. B.; SANTANNA, O. B.; PINTO JR., F.; DE ALMEIDA, L.; SOUZA, N. Large net CO₂ loss from a grass-dominated tropical savanna in south-central Brazil in response to seasonal and interannual drought. *Geophys. Res. Biogeoscience*, v. 121, p. 2110-2124, 2016.

BARBOSA, A. D. M. Ambiente de produção na eficiência da conversão de energia solar em cultivares de cana-de-açúcar. UNESP, 2017, 180 p. Tese de doutorado.

BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 13, p. 15–25, 2018.

BERTOLANI, F.C.; JOAQUIM, A.C.; DONZELLI, J.L. Sistema de Classificação edafoclimática para a Cultura de Cana-de-açúcar. In: Sistema de Produção Mecanizada da Cana-de-açúcar Integrada à Produção de Energia e Alimentos, Brasília, EMBRAPA, 362 p. 2015.

BORÉM, A.; SANTOS, F. Cana-de-açúcar: do plantio à colheita. 1. ed. Viçosa, MG: UFV, 2016.

CAVALCANTE, E. P.; PRADO, H. DO. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de latossolos da região de Araxá-MG. *Nucleus*, v. 7, n. 2, p. 115–124, 2010.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v. 267, p. 156–168, 2016.

CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/dados/entrada.htm>>. Acesso em 06 fev. 2019.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Brasília, DF. Companhia nacional de abastecimento, 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/22956_506e8f00170422c62a452d3e319a6d6f>.

COUTO JUNIOR, A. F. Análise Temporal Da Cobertura Vegetal E Do Solo Da Área Do Ecomuseu Do Cerrado (Goiás) Através De Imagens Modis E CBERS. Universidade de Brasília, 2007. 61 p. Tese de Doutorado.

DONZELLI, J. L.; BERTOLANI, F. C. Sugarcane Cultivation : Soil Mapping, Environmental Effects, and New Sugarcane Varieties. *Advances in Sugarcane Biorefinery*, p. 1-16, 2018.

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S., COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.; SPOTO, F.; SY, O.; MARCHESE, F.; BARGELLINI, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, v. 120, p. 25–36, 2012.

DUFT, D. G. et al. Comparação do desempenho de índices de vegetação do sensor MODIS para mapeamento sistemático da cana-de-açúcar. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 2727–2734, 2015.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. *ArcGis professional GIS for the desktop*, versão 10.2.2, 2014.

ESA, European Space Agency. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>>. Acesso: Janeiro, 2017.

ESTADOS UNIDOS. United States Geological Survey, *Earth Explorer*. 2015.

FILOSO, S.; DO CARMO, J. B.; MARDEGAN, S. F.; LINS, S. R. M.; GOMES, T. F.; MARTINELLI, L. A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 52, p. 1847–1856, 2015.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, v.80, n. 1, p.76-87, 2002.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. *Journal of Soil Science*, v. 34, p. 405-428, 1983.

GRECCHI, R. C.; GWYN, Q. H. J.; BÉNIÉ, G. B.; FORMAGGIO, A. R.; FAHL, F. C. Land Use and Land Cover Changes in The Brazilian Cerrado: A Multidisciplinary Approach to Assess the Impacts of Agricultural Expansion. *Applied Geography*, v. 55, p. 300–312, 2014.

GU, Y.; WYLIE, B. K.; HOWARD, D. M.; PHUYAL, K. P.; JI, L. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA. *Ecological Indicators*, v. 30, p. 1 – 6, 2013.

GUARENGHI, M. M.; WALTER, A. Assessing Potential Impacts of Sugarcane Production on Water Resources: A Case Study in Brazil. *Biofuels, Bioproducts And Biorefining*, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2016.

HENRIQUE, C.; SOUZA, W.; MERCANTE, E.; ADRIANI, J.; AUGUSTO, R.; LAMPARELLI, C.; URIBE-OPAZO, M. A. Mapping and discrimination of soya bean and corn crops using spectro-temporal profiles of vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, v. 36, n. 7, p. 1809 – 1824, 2015.

HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHRÖDER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use, v. 1180, n. 11, p. 1154–1180, 2015.

JIANG, Z. et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 10, p. 3833–3845, 2008.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Soil structure. In: WARRICK, A. W. *Soil physics companion*. Boca Raton: CRC Press, cap. 7, p. 249-296, 2002.

LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, M. A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. *Scientia Agricola*, v. 60, p. 741-745, 2003.

Lu, L.; Kuenzer, C.; Wang, C.; Guo, H.; Li, Q. Evaluation of Three MODIS-Derived Vegetation Index Time Series for Dryland Vegetation Dynamics Monitoring. *Remote Sensing*, v. 7, p. 7597–7614, 2015.

LUCIANO, A. C. S. et al. Remote Sensing of Environment Generalized space-time classifiers for monitoring sugarcane areas in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, v. 215, p. 438–451, 2018.

MANZATTO, C. V. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil: seleção de terras potenciais para a expansão do seu cultivo. *Manejo e Conservação Do Solo e Da Água No Contexto Das Mudanças Ambientais*, v. 1, 2008, 7 p.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; & PEREIRA, S. E. M. Zoneamento Agroecológico da Cana-de Açúcar: Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. *Embrapa Solos*, 2009, 55 p.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agricolacientia*, v. 58, n. 2, p. 295–301, 2001.

MONDAL, P. Quantifying surface gradients with a 2-band Enhanced Vegetation Index (EVI2). *Ecological Indicators*, v. 11, n. 3, p. 918–924, 2011.

PRADO, H. *Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais*. 4. ed. Piracicaba, 2013, 284 p.

PRADO, H.; VAN LIER, Q. J.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Classes de disponibilidade de água e o volume de água disponível (l m⁻³) para três níveis de evapotranspiração potencial. Disponível em: <http://www.pedologiafacil.com.br/artig_4.php> Acesso em: dez. 2018.

RODRIGUES, T. R.; VOURLITIS, G. L.; LOBO, F. A.; OLIVEIRA, R. G.; NOGUEIRA, J. S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south-central Mato Grosso, Brazil. *J. Geophysics Biogeoscience*, 2014.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166, p. 113–24, 2010.

SHEN, Z.; FU, G.; YU, C.; SUN, W.; ZHANG, X. Relationship between the Growing Season Maximum Enhanced Vegetation Index and Climatic Factors on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, v. 6, p. 6765 – 6789, 2014.

SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 521–528, 2018.

SILVA, R. P.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; PEDROSA, E. M. R.; TAVARES, U. E.; SANTOS, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil and Tillage Research*, v. 181, n. 3, p. 1–10, 2018.

SIEG - Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográfica de Goiás –. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em: 01 jan. 2019.

SZABÓ, S.; GÁCSI, Z.; BALÁZS, B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Landscape & Environment*, v. 10, n. 3-4, p. 194–202, 2016.

VAN DER MEER, F. D.; VAN DER WERFF, H. M. A.; VAN RUITENBEEK, F. J. A. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, v. 148, p. 124–133, 2014.

VARGA, Z.; CZEDLI, H.; KEZI, C.; LÓKI, J.; FEKETE, Á.; BIRO, J. Evaluating the Accuracy of Orthophotos and Satellite Images in the Context of Road Centerlines in Test Sites in Hungary. *Research Journal of Applied Sciences*, v. 10, p. 568-573, 2015.

VIEIRA, E. A.; CRISTINA, F.; GALVÃO, A.; BARROS, A. L. Influence of water limitation on the competitive interaction between two Cerrado species and the invasive grass *Brachiaria brizantha* cv. Piatã. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 135, p. 206–214, 2019.

VITTI, A. C.; PRADO, H. PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇUCAR EM FUNÇÃO DO AMBIENTE E DISPONIBILIDADE HIDRICA. Pesquisa e Tecnologia, v. 9, n. 2, p. 9, 2012.

ANEXO A – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho

