

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR
EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO UTILIZANDO
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Gildriano Soares de Oliveira

Engenheiro Agrônomo

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR
EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO UTILIZANDO
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Gildriano Soares de Oliveira

Orientador: Prof^a. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Sérgio Vanzela

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2015

Oliveira, Gildriano Soares de
O48p Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função dos
índices de vegetação utilizando técnicas de sensoriamento remoto /
Gildriano Soares de Oliveira. – – Jaboticabal, 2015
xv, 65 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra
Coorientador: Luiz Sérgio Vanzela
Banca examinadora: Andréa Cristiane Sanches, Sérgio Campos
Bibliografia

1. Sensoriamento remoto. 2. Cana-de-açúcar. 3. Landsat 8. 4. Área
foliar. 5. Biomassa. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:528.8

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento
da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP,
Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

AUTOR: GILDRIANO SOARES DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIZ SERGIO VANZELA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Profa. Dra. ANDREA CRISTIANE SANCHES

Universidade Camilo Castelo Branco / Fernandópolis/SP


Prof. Dr. SÉRGIO CAMPOS

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Botucatu

Participação por videoconferência

Data da realização: 09 de novembro de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

GILDRIANO SOARES DE OLIVEIRA, nascido em 16 de junho de 1988 em Campina Verde, MG. Graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Camilo Castelo Branco - UNICASTELO de Fernandópolis/SP (2010). Coursou Pós-Graduação *Latus* em Georreferenciamento de imóveis Rurais na Fundação Educacional de Fernandópolis/SP (2014). Coursou Especialização em Cadastro Ambiental Rural na Universidade Federal de Lavras (2014-2015). No período de 2014 a 2015 cursou mestrado em Agronomia no programa de Ciência do Solo na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV UNESP – Câmpus de Jaboticabal. Professor na Instituição Moura Lacerda em Ribeirão Preto, na Universidade de Araraquara – UNIARA e na Pós-Graduação em Georreferenciamento de Imóveis Rurais na Universidade de Brasília. Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Sensoriamento Remoto, atuando principalmente nos seguintes temas: Georreferenciamento (Código Geomensor FUV), Geoprocessamento, Gestão de Bacias Hidrográficas, Uso e Conservação do Solo e Água, Fertilidade do Solos, Mecânica dos Solos, Geologia, Cartografia, Topografia, Sistema de Posicionamento Global, Geodésia, Perícias Agrônômicas, Ambientais e de Avaliação de imóveis rurais para fins diversos.

Epígrafe

Ando devagar, porque já tive pressa e levo esse sorriso porque já chorei demais.

Hoje me sinto mais forte, mais feliz, quem sabe.

Só levo a certeza de que muito pouco sei ou nada sei.

Conhecer as manhas e as manhãs, o sabor das massas e das maçãs.

É preciso amor pra poder pulsar, é preciso paz pra poder sorrir, é preciso a chuva para florir.

Penso que cumprir a vida seja simplesmente compreender a marcha e ir tocando em frente.

Como um velho boiadeiro levando a boiada eu vou tocando os dias pela longa estrada, eu vou, estrada eu sou!

Conhecer as manhas e as manhãs, o sabor das massas e das maçãs.

É preciso amor pra poder pulsar, é preciso paz pra poder sorrir, é preciso a chuva para florir.

Todo mundo ama um dia, todo mundo chora, um dia a gente chega e no outro vai embora.

Cada um de nós compõe a sua história, cada ser em si carrega o dom de ser capaz, E ser feliz!

Almir Sater

Dedicatória

*Com muito amor e carinho aos meus pais, **Gilmar Soares Rosa** e **Rosimar Janne de Oliveira Pimenta Soares**. Pais sempre presentes que me ensinaram os valores de integridade moral e honestidade, que sempre estão ao meu lado nos momentos bons e ruins.*

*A minha irmã, **Gilmara Soares de Oliveira** e esposo **Edmar Antônio Oliveira**; e meus amados sobrinhos **Rayssa Soares de Oliveira** e **Luiz Augusto Soares de Oliveira**.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me dar força e proteção para vencer todos os desafios durante essa jornada.

À Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra, pelo incentivo, estímulo, apoio, paciência e ensinamentos transmitidos. Ofereço meus agradecimentos e respeito pelo seu profissionalismo e sabedoria. Sinto-me honrado por ter sido seu orientado.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Luiz Sérgio Vanzela, que me acompanha desde a graduação, pela disponibilidade em me auxiliar com o desenvolvimento da dissertação, pela orientações e conselhos, um Professor, um Mestre que muito me admira pelo conhecimento e humildade.

Ao Professor Dr. José Marques Júnior coordenador do Programa de Mestrado em Ciência do Solo, ao Professor Dr. Afonso Lopes, pelas vezes que necessitei de orientações, conselhos e estímulos para continuar minha caminhada.

À Cidinha Tostes e Rodrigo Figueira que foram meus pais aqui em Jaboticabal, pela ajuda em tudo e me fazendo como um membro da família sempre me apoiando e me aconselhando.

Aos amigos de Departamento pela ajuda necessária e pelos momentos que passamos juntos: Ronaldo, Izilda, Thyago Lira, Janaína Guidolini, Franciele Morlin pela ajuda, companheirismo, e pelo tempo dedicado a me ajudar.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. CANA-DE-AÇÚCAR (<i>SACCHARUM OFFICINARUM L.</i>)	3
2.2. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	8
2.3. PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA.....	15
2.4. SENSORIAMENTO REMOTO	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	19
3.2 METODOLOGIA	22
3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5. CONCLUSÃO.....	58
6. REFERÊNCIAS	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Balanço Hídrico da região onde está inserida a área objeto de estudo.	21
Tabela 2. Características do sensor orbital do satélite utilizado.....	23
Tabela 3. Cenas, datas de passagem e valores de M_p , A_p e θ_{se} , das imagens do satélite LANDSAT 8, utilizadas nos cálculos dos NDVI's	25
Tabela 4. Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação.	27
Tabela 5. Resultado da análise de regressão aos 7 meses de idade para a safra de 2012/2013.	31
Tabela 6. Resultado da análise de regressão aos 7 meses de idade para a safra de 2013/2014.	34
Tabela 7. Resultado da análise de regressão aos 8 meses de idade para a safra de 2012/2013.	37
Tabela 8. Resultado da análise de regressão aos 8 meses de idade para a safra de 2013/2014.	40
Tabela 9. Resultado da análise de regressão aos 9 meses de idade para a safra de 2012/2013.	43
Tabela 10. Resultado da análise de regressão aos 9 meses de idade para a safra de 2013/2014.	46
Tabela 11. Resultado da análise de regressão aos 10 meses de idade para a safra de 2012/2013.	49
Tabela 12. Resultado da análise de regressão aos 10 meses de idade para a safra de 2013/2014.	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização área experimental sucroenergética.....	19
Figura 2. Mapa de solos da área comercial sucroenergética.....	20
Figura 3. Mapa das variedades existentes na área comercial sucroenergética.	22
Figura 4. Evolução mensal da cultura após a colheita e as respectivas datas das imagens selecionadas para os dois anos agrícolas.....	26
Figura 5. Correlação entre produtividade de biomassa de cana-de-açúcar e NDVI nos períodos 7, 8, 9 e 10, nos dois anos agrícolas (2013/2014).	29
Figura 6. Correlação entre produtividade de biomassa de cana-de-açúcar e NDVI, para a melhor variedade, nos períodos 7, 8, 9 e 10, nos dois anos agrícolas (2013/2014).	30
Figura 7. Transformação de imagem NDVI aos 7 meses de idade da planta em Produtividade biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.	33
Figura 8. Transformação de imagem NDVI aos 7 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.	36
Figura 9. Transformação de imagem NDVI aos 8 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.	39
Figura 10. Detalhe da transformação de imagem NDVI aos 8 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.	42
Figura 11. Transformação de imagem NDVI aos 9 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.	45
Figura 12. Transformação de imagem NDVI aos 9 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.	48
Figura 13. Transformação de imagem NDVI aos 10 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para a safra 2012/2013.....	31
Gráfico 2. Produtividade biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2012/2013.....	32
Gráfico 3. Produtividade biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para a safra 2013/2014.....	34
Gráfico 4. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2013/2014.....	35
Gráfico 5. Produtividade biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para a safra 2012/2013.....	37
Gráfico 6. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2012/2013.....	38
Gráfico 7. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para a safra 2013/2014.....	40
Gráfico 8. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2013/2014.....	41
Gráfico 9. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para a safra 2012/2013.....	43
Gráfico 10. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2012/2013.....	44
Gráfico 11. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para a safra 2013/2014.....	46
Gráfico 12. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para variedade SP91-1285 para a safra 2013/2014.....	47
Gráfico 13. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para a safra 2012/2013.....	49
Gráfico 14. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para variedade IAC91-2195 para a safra 2012/2013.	50
Gráfico 15. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para a safra 2013/2014.....	52
Gráfico 16. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para variedade SP91-1285 para a safra 2013/2014.....	53

Os mapas aqui apresentados foram elaborados por meio do *software* ArcGIS®10, propriedade intelectual da ESRI® e utilizado sob licença. Copyright® Esri. Todos os direitos reservados. Para mais informações consultar: www.esri.com.

The maps presented here were developed in ArcGIS® 10 software, intellectual property of ESRI® and used under license. Copyright® Esri. All rights reserved. For more information visit: www.esri.com.

PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

RESUMO – A relevância da cana no setor energético, na produção de açúcar e etanol, é imprescindível para o agronegócio brasileiro e tem mostrado bom desempenho a cada ano agrícola. O presente trabalho tem por objetivo determinar modelos matemáticos para estimar a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI, por meio de imagens do sensor OLI do satélite Landsat 8. O estudo foi realizado em uma extensão territorial do município de Barrinha, em uma área experimental sucroenergética, localizada no nordeste do Estado de São Paulo, região administrativa de Ribeirão Preto. A avaliação da estimativa da produtividade de biomassa de cana-de-açúcar por sensores remotos foi realizada pela modelagem matemática da produtividade em função do NDVI. Para as imagens de cada data coletada, realizou-se o cálculo do valor médio dos pixels dentro da área de cada talhão, e *a posteriori* a análise de variância por regressão linear para as variedades nas diferentes idades de plantas e nos dois anos agrícolas (2012/2013 e 2013/2014). Os modelos foram selecionados pelo nível de significância, coeficiente de determinação e correlação. O modelo matemático que melhor estimou a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI e obteve a significância estatística, foi no período de 8 meses de idade após a colheita ($Y = 3823,3e^{-5,646NDVI}$; $R^2=0,466$; $p=0,002$) para a safra de 2012/2013 e a melhor qualidade estatística para 2013/2014, com imagens NDVI, foram aos 8 meses ($Y = 31,986e^{1,2071NDVI}$; $R^2 = 0,213$; $p=0,054$), 9 meses ($Y = 66,723NDVI + 31,399$; $R^2 = 0,201$; $p=0,062$) e aos 7 meses de idade após o corte ($Y = 101,5NDVI^{0,9536}$; $R^2 = 0,170$; $p=0,089$).

Palavras-chave: sensoriamento remoto, cana-de-açúcar, Landsat 8, área foliar, biomassa

SUGAR CANE BIOMASS PRODUCTIVITY BY VEGETATION INDICES USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

ABSTRACT – The relevance of sugarcane in the energy sector and the production of sugar and ethanol are essential for Brazilian agribusiness and have shown good performance at each crop year. This study aims to determine mathematical models to estimate the biomass productivity of sugarcane in function of NDVI, through images of OLI sensor by Landsat 8. The study was conducted on a territorial extension of Barrinha County, in a sugarcane experimental area, located in the northeast of São Paulo, administrative region of Ribeirão Preto. The evaluation of the estimated biomass productivity of sugarcane by remote sensors was carried out by mathematical modeling productivity, using NDVI images. For all images of each date, there has been calculated the average value of the NDVI pixels within the area of each block, and a linear regression analysis of variance for the varieties in the different ages of plants and at two growing seasons (2012/2013 and 2013/2014) was performed. The models were selected by the significance of the coefficient of determination and correlation. The mathematical model that estimated the biomass productivity of sugarcane in function of NDVI images and the best statistical significance was within 8 months old after harvest ($Y = 3823,3e-5,646NDVI$; $R^2 = 0.466$; $p = 0.002$) for the harvest of 2012/2013 and the best statistical quality to 2013/2014, with NDVI images, were at 8 months ($Y = 31,986e1,2071NDVI$; $R^2 = 0.213$; $p = 0.054$), 9 months ($Y = + 31.399 66,723NDVI$; $R^2 = 0.201$; $p = 0.062$) and at 7 months of age after cutting ($Y = 101,5NDVI0,9536$; $R^2 = 0.170$; $p = 0.089$).

Keywords: remote sensing, sugarcane, Landsat 8, leaf area, biomass

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto é uma técnica para obter dados espaciais e a sua adoção se ajusta muito bem aos propósitos para obter informações precisas sobre o sistema de produção das culturas e auxilia no gerenciamento da produção.

Dentre as tecnologias existentes no mercado, a geotecnologia é uma ferramenta que possibilita a visualização temporo espacial do uso do solo. Assim, aplicada a interpretação de imagens de sensores remotos e, em particular, pelos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) permite auxiliar na avaliação das áreas verdes, biomassa, índice de área foliar, teor de clorofila, deficiência nutricional etc.

Vários são os índices que possuem boa correlação com a produtividade de biomassa e que poderiam ser utilizados na estimativa de culturas agrícolas. Isto porque os parâmetros biofísicos da vegetação podem ser obtidos por sensores remotos. Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que relacionam com a atividade da vegetação.

Sendo a estimativa da produtividade um dos dados mais importantes para o planejamento no setor público e iniciativa privada, o monitoramento de áreas agrícolas com o uso de geotecnologias e do sensoriamento remoto é de suma importância para contribuir significativamente para o desenvolvimento agrícola do Brasil.

Para a estimativa desta variável é necessário obter metodologias eficazes e de baixo custo, especialmente no Brasil, que possui grande extensão territorial.

Com isso, novos métodos mais baratos e precisos de estimar a produção antecipada de biomassa estão cada vez mais ganhando precisão e uso prático. Um desses métodos é a utilização da correlação entre índices de vegetação, obtidos pela combinação de bandas espectrais de sensores orbitais, com a produtividade de biomassa das culturas (NRSA, 2012).

Ante o exposto, estimar antecipadamente a produção de biomassa de cana-de-açúcar é uma das etapas primordiais para planejar a logística da cultura, que apresenta várias etapas, tais como: corte, colheita e transporte, ambiente de

produção, levantamento de talhões falhados, manejo de pragas, doenças e nutrição e também, de suma importância na última etapa na cadeia de produção, que é a comercialização do produto final.

Com base nos pressupostos apresentados, torna-se imprescindível realizar pesquisas que determinem modelos calibrados entre os índices de vegetação e a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar, com a finalidade de alcançar alternativas para aprimorar a estimativa da produtividade, que pode reduzir os custos destes levantamentos.

O presente trabalho tem por objetivo determinar modelos matemáticos para estimar a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), por meio de imagens do sensor OLI do satélite Landsat 8.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)

Segundo Segato et. al. (2006), a cana-de-açúcar é originária da Nova-Guiné e foi levada para o sul da Ásia, onde foi usada de início na forma de xarope. Ela é uma poácea semiperene, que possibilita vários cortes sem necessidade de replantio e expressa desenvolvimento satisfatório em solos aerados, bem drenados, o que denota que ela exige solos com profundidades acima de um metro.

A cana-de-açúcar possui metabolismo fotossintético C4, ou seja, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora e, para efeito de parâmetro, chega a acumular o dobro de biomassa que uma planta C3, como a soja. Além disso, as plantas C4 possuem um mecanismo que diminui a perda de água em ambientes secos (ALENCAR, 2012).

A cana-de-açúcar é adaptada as condições de intensidade luminosa alta, temperaturas elevadas e relativa escassez de água, já que a cultura necessita de grandes quantidades de água para suprir as necessidades hídricas, uma vez que somente 30% de sua massa é representada por matéria seca e, 70% pela água dependendo do estágio fenológico. Sua capacidade em absorver água pelas folhas é maior do que em qualquer outra poácea, entretanto, é o sistema radicular, em seus pelos absorventes, o responsável pela maior quantidade de água absorvida. O orvalho da madrugada e os chuviscos, que não chegam a atingir o solo, são absorvidos por suas folhas. A cana é uma espécie, portanto, ideal para o cultivo em regiões tropicais. No entanto, o conhecimento do ciclo da cultura é importante para melhor manejá-la, pois se sabe que qualquer produção vegetal que vise a máxima produtividade econômica, fundamenta-se na interação de três fatores: a planta, o ambiente de produção e o manejo (SEGATO, et. al., 2006).

A profundidade do sistema radicular formado depende, principalmente, do cultivar e das condições edáficas como por exemplo a umidade e as características físicas e químicas do solo (FAUCONNIER e BASSEREAU, 1975).

Dillewijn (1952) descreve a existência dos tipos básicos de raízes na cana-de-açúcar: as raízes superficiais, ramificadas e absorventes; as raízes de fixação mais profundas; e, as raízes-cordão, que podem aprofundar-se até 6 metros, este mesmo autor relata que as raízes da soqueira são mais superficiais que as da cana-planta, logo verifica-se que quanto maior o número de cortes, mais superficial fica o sistema radicular das soqueiras.

O colmo é cilíndrico, ereto e fibroso e rico em açúcar. A composição aproximada da cana-de-açúcar é a seguinte: possui 86 a 92% de caldo e 8 a 14% de fibras (matéria insolúvel em água). O caldo por sua vez, é composto de água (75 a 82%) e 18 a 25% de sólido solúveis totais (°Brix) (CASTRO, et al., 2008). De acordo com Rodrigues (1995), as características intrínsecas da variedade definem o número de colmos por planta, a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento, a largura das folhas e a arquitetura foliar, mas as expressões destes caracteres são influenciadas por fatores externos, como as condições climáticas, o manejo e as práticas culturais adotadas.

Segundo Casagrande (1991), a cana é propagada vegetativamente, e a propagação por sementes só se processa após os cruzamentos orientados nos programas de melhoramento de cultivares. O desenvolvimento da cana é basicamente dividido em dois ciclos. O primeiro ciclo da cultura é denominado cana-planta onde a cultura não teve seu primeiro corte e seu período varia de 12 a 18 meses, dependendo da variedade. Após o primeiro corte encerra-se o primeiro ciclo e se inicia o ciclo da cana-soca, neste ciclo o período passa a ser de 12 meses para todas as variedades.

Uma das características das poáceas é a capacidade de perfilhamento. O perfilhamento é o processo no qual a planta emite brotações, colmos ou hastes laterais na mesma planta, os quais recebem a denominação de perfilhos, sendo que esta é a razão mais importante para a produtividade de culturas, como a cana-de-açúcar. A cultura perfilha nos primeiros meses após o plantio (ou após a rebrota) e os fatores que são responsáveis inicialmente pelo perfilhamento são a temperatura e

a radiação solar, mas a variedade utilizada, a densidade do plantio, o ciclo (cana-/planta ou soca), assim como a disponibilidade de água e a de nitrogênio no solo também podem ser determinantes pela intensidade do perfilhamento (SUGUITANI; MATSUOKA, 2001).

O aumento do perfilhamento de cana-de-açúcar estende-se até os 180 dias após o plantio da cana, ou após o corte da cana-soca e varia em função das condições de temperatura e a disponibilidade hídrica favorável. Após este período há uma redução de cerca de 50% no perfilhamento e a partir dos 270 dias o número de perfilhos tende a estabilizar-se, o que é uma característica fisiológica da cana-de-açúcar. Um dos fatores que favorece a estabilização do perfilhamento é o sombreamento ocasionado pela própria cultura, o auto sombreamento, mas em contrapartida, isso induz a aceleração do crescimento do colmo principal. A limitação de crescimento nesta fase ocorre apenas quando há déficit no suprimento de água, ocorrência de baixas temperaturas ou ainda devido ao florescimento, sendo este processo indesejável em culturas comerciais. (DILLEWIJN, 1952; BARBIERI, 1993; PRADO, 1988, DAROS et al., 1999; SILVA et al. 2002; CASTRO e CHRISTOFOLETTI, 2005).

O ambiente de produção é o conjunto das interações dos atributos dos solos com as condições climáticas locais. As condições físico-hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos associadas com o clima (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação e ventos) sob manejo adequado da camada arável com relação ao preparo, calagem, adubação, controle de plantas daninhas e pragas do solo, representam os diferentes ambientes de produção (PRADO e PÁDUA JÚNIOR, 2006).

Portanto, o ambiente de produção é a interação entre a relação solo-planta-atmosfera, associada ao manejo cultural da cana, possibilitando assim a indicação das variedades propícias para a cada região.

Segundo Castro et al. (2008), a cultura da cana-de-açúcar desenvolve-se melhor em solos de boa fertilidade, profundos, argilosos, com boa capacidade de retenção de água, mas sem ocasionar encharcamento, e com pH de 6,0 a 6,5, mas encontram-se cultivos de cana-de-açúcar em solos com pH desde 4 até 8,5,

apresentando, portanto, redução na produtividade na medida que caminha para os valores extremos.

O manejo varietal da cana-de-açúcar é uma ferramenta estratégica que procura identificar os parâmetros quantitativos e qualitativos da interação genótipo versus ambiente, ou seja, obter ou localizar diferentes variedades comerciais que proporcione maior produção agrícola (LANDELL e ALVAREZ, 1993).

A adubação, de maneira geral, pode ser definida pela necessidade nutricional da cultura subtraindo os nutrientes fornecidos pelo solo multiplicado por um fator de eficiência de absorção. A necessidade nutricional da cultura da cana-de-açúcar é definida realizando-se a avaliação do estoque de nutrientes disponíveis no solo e pela eficiência da absorção. Para avaliação do estoque de nutrientes, são utilizadas a diagnose visual e foliar, assim como as análises do solo. Para complementação, pode-se utilizar as análises do caldo da cana (DEMATTE, 2004).

Os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são exigidos em maior quantidade pelas plantas devendo ser repostos com maior frequência. Já o cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e os micronutrientes são exigidos em quantidades menores, todavia estes são tão importantes quanto os demais, ou seja, cada nutriente desempenha uma função indispensável para o crescimento e desenvolvimento da cana (SEGATO, et. al., 2006).

Segundo Câmara (1993), o processo produtivo da cana-de-açúcar visa três parâmetros básicos:

- Produtividade: alta produção de biomassa (fitomassa) por unidade de área, ou seja, elevada produção de colmos industrializáveis ricos em conteúdo celular (sacarose).
- Qualidade: riqueza de açúcar dos colmos industrializáveis, caracterizando matéria-prima de qualidade.
- Longevidade do canavial: visa aumentar o número de cortes econômicos, aumentando assim o tempo entre as reformas do canavial.

Segundo Malavolta (1984), o manejo do solo para implantação da cana-de-açúcar está dividido em: preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto.

- Preparo convencional: o preparo consiste na realização de operações sucessivas (sistematização, distribuição de corretivos, aração, gradagem pesada,

subsolagem e gradagem niveladora) para deixar o terreno apto para receber a cultura da cana-de-açúcar.

- Cultivo mínimo: é a diminuição do trabalho de revolvimento do solo, podendo ser composto das seguintes operações: sistematização do terreno, distribuição de corretivo na superfície, subsolagem (quando detectada a presença de camada compactada) e eliminação química dos restos culturais.
- Plantio direto: pode ser definido como um sistema onde a semeadura é realizada em solo não revolvido e que depende do controle de plantas daninhas através de herbicidas. Geralmente duas aplicações de herbicidas com ação dessecante e residual secam as plantas daninhas e formam juntamente com a resteva, a cobertura morta que protege o solo e favorece o desenvolvimento inicial da cultura. Uma terceira pulverização com herbicidas pós-emergentes controla as plantas daninhas que eventualmente emergem após a semeadura.

A relevância da cana no setor energético, na produção de açúcar e etanol é imprescindível no agronegócio brasileiro e tem mostrado um crescimento linear a cada ano agrícola, embora a crise que o setor enfrenta. Com fulcro nas informações da UNICA (2014) essa produção leva a uma faturação na balança comercial de US\$ 68 bilhões de dólares, representando 27% do PIB e 7,5% da arrecadação interna brasileira, tal importância no *agribusiness* ressalta a salutar necessidade de aplicações de tecnologias eficientes que visem melhorar a produtividade e qualidade do produto.

Corroborando com a CONAB (2015), a produção total de cana-de-açúcar destinada a indústria, estimada para a safra de 2015/16 é de 654,6 milhões de toneladas com acréscimo de 3,1% (19,8 milhões de toneladas) em relação à safra 2014/15, que foi de 634,8 milhões de toneladas. A região Sudeste sozinha é responsável por aproximadamente 64% da produção total para a safra em questão (418,9 milhões de toneladas).

A produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) em seu ciclo agrícola, depende das condições químicas e físico-hídricas das camadas superficiais e sub-superficiais dos solos, juntamente com as condições climáticas, formando os chamados ambientes de produção. O manejo básico da cultura nos ambientes considera que é feito corretamente o preparo do solo e plantio; o controle das ervas

daninhas e o manejo fitossanitário; época de plantio e colheita além da escolha varietal em relação aos ambientes; doses adequadas de corretivos e fertilizantes; controle local evitando a erosão e que não ocorra impedimentos químicos, físicos e biológicos no solo que limitem o desenvolvimento do sistema radicular, tais ambientes originais alteram favoravelmente quando é feito manejo intensivo com aplicação de vinhaça, torta de filtro, com adubação verde, irrigação, porém alteram desfavoravelmente quando as condições climáticas são anormais, como distribuição irregular de precipitação, déficit hídrico prolongado e geadas (PRADO e PÁDUA JÚNIOR, 2006).

Recentemente a adoção do sensoriamento remoto tem buscado cada vez mais recursos para melhorar o gerenciamento dos recursos agrícolas.

É preciso, no entanto, que as áreas de plantio sejam iniciadas com tecnologias modernas que tragam não só maiores retornos financeiros ao produtor, mas também causem menores impactos no ambiente.

2.2. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

As propriedades de reflectância e transmitância das folhas foram apresentadas em trabalhos iniciais de Gates et al. (1965), Gausmann et al. (1969), e Wooley (1971), mostrando como a estrutura e os pigmentos das folhas afetam ângulos da luz, faixa do espectro eletromagnético, entre outros processos.

Das três componentes resultantes do fracionamento da radiação solar incidente, ao interagir com a planta, isto é reflexão, absorção e transmissão, percebe-se que a mais importante do ponto de vista fisiológico e bioquímico para a produtividade da planta é, sem dúvida, a absorção. Entretanto, para a grande maioria dos sistemas de sensoriamento remoto, principalmente, os orbitais e os suborbitais, medir esta parte da radiação é impossível, a não ser por meio de inferências baseadas no comportamento das quantidades refletidas e/ou emitidas pela vegetação. Neste aspecto, a energia refletida pela vegetação tem sido a mais utilizada, porque é nesta faixa do espectro eletromagnético que se dispõe da maior

quantidade de sensores orbitais e suborbitais capazes de registrar informações da superfície terrestre (MOREIRA, 2007).

Os principais mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas são: pigmentos, quantidade de água e estrutura celular. Na faixa do vermelho há uma maior absorção caso haja a presença de antocianina e β -caroteno. No infravermelho próximo, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é dominado pelas propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas. Estas estruturas, localizadas na parte mais interna da folha, chamada de mesófilo, possuem células com vacúolo e paredes hidratadas onde aumentam a reflexão propiciando melhor absorção da radiação pelos pigmentos (MOREIRA, 2007). No infravermelho médio, a reflectância da vegetação caracteriza-se por um decréscimo dos valores da energia refletida, afetada principalmente pelo conteúdo de água foliar.

Desde a década de 1960, os cientistas vêm extraindo e modelando vários parâmetros biofísicos da vegetação com o uso de dados de sensoriamento remoto. Grande parte desse esforço tem envolvido o uso de índices de vegetação – que são medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida. Um índice de vegetação ideal deve maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas, preferencialmente de uma forma linear, além de normalizar efeitos externos e internos em relação ao dossel. Deve também ser acoplável a algum parâmetro biofísico mensurável, tais como a biomassa, o IAF, para fins de validação e de controle de qualidade, (JENSEN, 2009).

Os primeiros estudos (JORDAN, 1969; PEARSON; MILLER, 1972) iniciaram com aplicação da razão simples entre bandas, no caso do infravermelho próximo (IVP) e vermelho (V), gerando os índices de vegetação RATIO e RVI, dados pelas equações (1) e (2) respectivamente, onde constata melhor equiparação com a biomassa, salientando a resposta da vegetação.

$$RATIO = \frac{(IVP - V)}{V} \dots\dots\dots(1)$$

$$RVI = \frac{V}{IVP} \dots\dots\dots(2)$$

Com igual propósito foram criados por Rouse et al. (1973) o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação transformado (TVI), especificado pelas equações (3) e (4) respectivamente, na tentativa de atenuar as intervenções do solo, atmosfera e variações do ângulo do sol.

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \dots\dots\dots(3)$$

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5} \dots\dots\dots(4)$$

Segundo Wang et al. (2005), o NDVI é intensamente relacionado com o IAF; todavia, esta relação pode não ser tão forte nesses períodos de máximo IAF, ao que tudo indica, em virtude da saturação do NDVI quando o IAF é muito alto.

Richardson e Wiegand (1977) propuseram o índice de vegetação perpendicular (PVI) dado pela equação (5), que retrata, em um plano cartesiano V versus IVP, a distância perpendicular entre a referência espectral do solo implícito na vegetação:

$$PVI = \frac{(IVP - a \cdot V - b)}{\sqrt{a^2 + 1}} \dots\dots\dots(5)$$

onde: “a” e “b” são coeficiente das retas de solos.

Entre as variações do NDVI, revelou-se o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) por Huete (1988), por meio da equação (6), objetivando diminuir o efeito do solo sobre diferentes densidades de cobertura vegetal, por meio do desvio do par

ordenado V versus IVP para o ponto de junção da linha do solo com a linha da vegetação, pela inclusão de uma constante L.

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)}(1 + L) \dots\dots\dots(6)$$

Analisando diferentes valores para a constante L em distintas densidades de vegetação e para dois tipos de solos (baixo e alto brilho), Huete (1988) atentou que, aumentando o IAF, o valor de L deve ser diminuído paulatinamente até que, obtido um IAF próximo a 3,6, a menor influência do solo sucederá com o L=0, quando o SAVI proporcional ao NDVI. Constitui-se L=0,5 como um valor de redução relevante do ruído do solo para uma gama de densidades de dosséis.

Foi elaborado, com os mesmos objetivos acima citados, o índice de vegetação transformado e ajustado ao solo (TSAVI) dado pela equação (7), sendo uma medida do ângulo entre a linha de solo e a linha de vegetação (BARET et al., 1989; BARET; GUYOT, 1991).

$$TSAVI = \frac{a \cdot (IVP - a) \cdot (V - b)}{(V) + (a \cdot IVP) - (a \cdot b)} \dots\dots\dots(7)$$

sendo: “a” e “b” a inclinação e o intercepto da linha de solo no par ordenado IVP versus V.

Clevers (1989) caracteriza o índice intitulado índice de vegetação por diferença ponderada (WDVI) dado pela equação (8).

$$WDVI = IVP - a \cdot V \dots\dots\dots(8)$$

sendo: “a” é inclinação da reta do solo.

Qi et al. (1994) determinaram modificações no cálculo do fator L do SAVI dada pela equação (10), ocasionando o índice de vegetação modificado e ajustado ao solo (MSAVI) retratado pela equação (9).

$$MSAVI = \frac{(IVP - V)}{IVP + V + L} (1 + L) \dots\dots\dots(9)$$

$$L = 1 - 2 \cdot a \cdot NDVI \cdot WDI \dots\dots\dots(10)$$

sendo: “a” é a inclinação da reta do solo.

Tentando atenuar a dependência do NDVI aos parâmetros atmosféricos, Kaufman e Tanré (1992) apontaram uma alteração na elaboração do índice de acordo com a equação (11), inferindo a informação atmosférica inclusa na banda azul.

$$ARVI = \frac{IVP - [V - \gamma(B - V)]}{IVP + [V - \gamma(B - V)]} \dots\dots\dots(11)$$

onde: “g” é o critério que coordena a atmosfera e depende do tipo de aerossol, sendo utilizado g=1 quando o modelo do aerossol não é válido; B representa a resposta do azul.

A mesma ótica de atenuação dos efeitos atmosféricos utilizados no ARVI foi aplicada por Gitelson et al. (1996) destacando o uso do canal verde (VD), obtendo o índice verde de resistência atmosférica (GARI) e o índice verde-vermelho de resistência atmosférica (GRARI) de acordo com as equações (12) e (13).

$$GARI = \frac{IVP - [VD - \lambda(B - V)]}{IVP + [VD - \lambda(B - V)]} \dots\dots\dots(12)$$

$$GRARI = \frac{IVP - [\eta VD + (I - \eta)V - \lambda(B - V)]}{IVP + [(I - \eta)V - \lambda(B - V)]} \dots\dots\dots(13)$$

onde: I é o parâmetro que controla a correção atmosférica e, empiricamente, pode ser aplicado como 1; “h” é um composto dentro do GRARI da reflectância condizente

ao comprimento de onda do verde e do vermelho na sequência para obter características que estão entre o ARVI e GARI.

Entre os índices aplicados por Gitelson et al., (1996) é importante indicar o índice de vegetação diferença normalizada verde ("Green" NDVI), dado pela equação (14). Neste estudo, este índice é representado pela sigla GNDVI

$$"Green" NDVI = \frac{IVP - VD}{IVP + VD} \dots\dots\dots(14)$$

Os índices decorrentes da transformação ortogonal "Tasseled Cap", utilizam as seis bandas não termiais do sensor TM e conferem pesos diferentes para cada uma delas por meio de equações lineares. Como produto, são originadas três imagens-síntese: "brightness", "greenness" e wetness" (CRIST; CICONE, 1984). A imagem "greenness", ou índice de vegetação GVI, é obtida de acordo com a equação (15):

$$GVI = -0,24717*TM1 - 0,16263*TM2 - 0,40639*TM3 + 0,85468*TM4 + 0,05493*TM5 - 0,11749*TM7 \dots\dots\dots(15)$$

onde: TM descreve os canais do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é representativo de vários índices de vegetação espectrais (KAZMIERCZAK, 1996). Este índice é uma técnica bastante importante utilizada para melhor visualizar os alvos no que diz respeito a variação da vegetação, e é a razão entre as bandas de alta correlação entre si, serve para realçar os alvos de interesse e a biomassa vegetal (FREIRE; PACHECO, 2005). O NDVI tem, portanto, uma relação direta com o vigor da vegetação, sendo assim, é possível o mapeamento de áreas com diferentes índices de cobertura vegetal e vigor de biomassa.

Dentre os exemplos de aplicação dos índices de vegetação, pode-se encontrar no trabalho de Huete (1988), que investigou a influência dos solos sobre os índices de vegetação, uma boa correlação dos índices NDVI e SAVI, com o IAF em culturas de algodão e com biomassa em gramíneas.

De acordo com sua sensibilidade em relação às variáveis da vegetação, os índices de vegetação podem realçar a variação espacial existente, como mostram Gitelson et al. (1996), analisando-se o coeficiente de variação dos índices NDVI, ARVI, GARI e GRARI de folhas de bordo e castanha-da-índia com uma variação da concentração de clorofila-A de 5mg/cm² a 44,8mg/cm², onde foi observado que a sensibilidade do GARI e GRARI foi três vezes superior ao ARVI e cinco vezes ao NDVI.

Rudorff (1985) avaliou o uso potencial do Landsat utilizando os índices de vegetação (RVI, DN, DDVI, TVI E TVI6), em conjunto com dados de um modelo agrometeorológico para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Em seu trabalho, foram localizadas áreas canavieiras em imagens de satélite, extraído-se os níveis de cinza, em que os melhores resultados foram alcançados com o uso dos dois estudos em conjunto (agrometeorológico e índice de vegetação).

Ambos os modelos de regressão linear explicaram, juntos, 56% da variação, enquanto os modelos agrometeorológicos e índices de vegetação, analisados separadamente, explicaram respectivamente 38% e 32% da variação.

Em seu trabalho, Rudorff (1985) demonstra o potencial de utilização dos dados do satélite Landsat para se estimar a produtividade e, ainda, quando considera preliminar o proposto em seu trabalho, justifica a elaboração de outros estudos.

Diante da importância da precisão no valor de reflectância e radiância das superfícies imageadas por um sensor remoto orbital e da influência da atmosfera nesta resposta espectral, faz-se necessário o conhecimento dos componentes atmosféricos que interferem neste processo.

Entre os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, pode-se citar a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor que resulta na diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases (principalmente vapor d'água, oxigênio e dióxido de carbono) e os aerossóis (pequenas partículas em suspensão) refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo (ZULLO, 1994).

Com o objetivo de remover os efeitos atmosféricos de imagem de sensoriamento remoto, Zullo (1994) desenvolveu um sistema computacional denominado de Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite (SCORADIS) baseado na teoria e os parâmetros atmosféricos calculados pelo MODELO 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solarie*).

Aplicando a correção atmosférica em algumas superfícies de imagens Landsat através do sistema Scoradis, Zullo Jr. (1994) observou que os valores do NDVI, de uma maneira geral, são subestimados devido à presença da atmosfera. Em uma área de cana foi observado valor do NDVI de 0,6 na imagem corrigida e 0,4 na imagem original.

2.3. PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA

De acordo com Han et al. (1994), o mapeamento da produtividade é um importante componente para a Agricultura de Precisão, pois identifica e quantifica a variabilidade espacial da produtividade das culturas e auxilia os processos de gerenciamento localizado. Molin (2001) descreve que as atividades relacionadas à Agricultura de Precisão compõem um ciclo fechado de tarefas e que este ciclo tem como ponto de partida a fase de mapeamento de produtividade. Segundo o autor, o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras.

Del Grossi et al. (2014) ressaltam que a estimativa da produtividade real de biomassa (PRB) é realizada em duas estimativas, sendo que a primeira realizada logo após a colheita quando o técnico observa com maior detalhe levando em conta o rendimento de cada unidade produtora (fazenda) na última safra, tipo de solo, fertilidade, estrutura, matéria orgânica, comportamento da variedade, ano de corte, práticas de manejo, ataque e pragas, doenças e condições climáticas e ervas daninha, entre outros. A segunda estimativa de safra é realizada entre os meses de fevereiro e março, período que antecede a colheita, quando todos os fatores considerados na primeira estimativa são novamente examinados e comparados com

a análise visual do técnico que depende do conhecimento espacial dos eventos acima, porém, a visualização possibilita somente a vistoria ao redor dos carregadores dos talhões de cana-de-açúcar. Observa-se, nessa inspeção, que o técnico analisa o comportamento das plantas principalmente nas bordas dos talhões, desconhecendo a proporção e a distribuição em todo o talhão de possíveis padrões diferenciados.

Diante das dificuldades e subjetividade na aplicação dessa metodologia de estimativa de safra, a utilização do sensoriamento remoto, através de dados orbitais do satélite Landsat-7 ETM+, pode auxiliar na estimativa de safra da cultura da cana-de-açúcar. Para a obtenção de informações a fim de se estimar a produção de uma lavoura de cana-de-açúcar, primeiramente, é necessário o conhecimento dos fatores que influenciam na resposta espectral da cultura imageada pelo satélite.

A produtividade de biomassa é o valor máximo em toneladas por hectare, de produtividade de cana-de-açúcar, obtida em campo devido a interação genótipo-ambiente.

2.4. SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento é a aquisição de dados sobre um objeto sem tocá-lo, sendo o conjunto de técnicas que possibilita obter informações sobre alvos na superfície terrestres (objetos, áreas, fenômenos), no registro da interação da radiação eletromagnética com a superfície à distância, isto é, sem contato direto.

Segundo Epiphany et al. (1996), o sensoriamento remoto é uma ferramenta ou técnica similar à matemática para medir a quantidade de energia eletromagnética que emana de um objeto ou área geográfica, a distância e, depois, se extrai informação importante dos dados usando algoritmos baseados em matemática e estatística para atividades científicas.

A radiação eletromagnética (REM) é o meio pelo qual a informação é transferida do objeto ao sensor. A REM é a interação dinâmica da energia com a matéria, sendo esta gerada toda vez que uma carga elétrica é acelerada. Ao conjunto de ondas eletromagnéticas que compõem o campo de radiação de um

determinado objeto; a esse conjunto se dá o nome de espectro, sendo que o espectro eletromagnético representa todo o conjunto de comprimentos de ondas conhecido, que vão desde raios gama até ondas de rádio.

Para o sensoriamento remoto da superfície terrestre a principal fonte de radiação eletromagnética é o sol. Segundo Novo (2008), a produção de energia pelo sol se dá por meio de um processo conhecido como ciclo próton-próton, que implica a conversão de quatro átomos de hidrogênio em um átomo de hélio e energia na forma de fótons e neutrinos.

As propriedades espectrais de uma folha são função de sua composição, morfologia e estrutura interna que, por sua vez, apresentam variações em função das diferentes variedades de cana.

Na faixa do espectro eletromagnético (EEM) de 0,4 a 2,6 μm , onde atua a maioria dos sensores ópticos, a vegetação possui uma reflectância típica que a diferencia dos demais alvos da superfície terrestre.

Essa faixa do EEM pode ser dividida em subfaixas denominadas de: visível (0,4 a 0,7 μm), infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μm) e infravermelho médio (1,3 a 2,6 μm).

A região do visível é caracterizada por uma baixa reflectância da vegetação decorrente de uma alta absorção da radiação solar que incide sobre as folhas. Os pigmentos das folhas são os principais responsáveis por essa absorção, pois captam a energia solar nessa região do EEM para ser utilizada no processo fotossintético.

Segundo Taiz e Zeiger (2004), somente 5% da energia solar incidente sobre as folhas é utilizada no processo da fotossíntese para a produção de carboidratos. Isto ocorre em parte porque a maior fração da energia solar incidente não é absorvida pelos pigmentos. Além disso, uma parcela de energia absorvida é perdida na forma de calor. Da parcela absorvida e convertida em carboidratos, uma parte é utilizada no metabolismo geral da folha.

Na região do infravermelho próximo, as propriedades ópticas da folha são dominadas, principalmente, pelas suas estruturas celulares. A reflectância pode chegar até 50%, dependendo da estrutura anatômica das folhas sendo que a absorção é muito baixa (menos de 15%) (TUCKER, 1977).

No infravermelho médio, a presença de água nas folhas prevalece na resposta espectral em função dos picos de absorção da água em torno de 1,45, 1,95, 2,7 e 6,3 μm .

A radiação solar nos comprimentos de onda de 400 a 700 nm é, frequentemente, referido como sendo a radiação fotossinteticamente ativa ou *Photosynthetic Active Radiation* (PAR). Da PAR incidente, 10 a 15% não são absorvidos pelos pigmentos, mas são refletidos ou transmitidos.

O comportamento espectral da cultura da cana-de-açúcar ao longo do seu ciclo de crescimento é mais bem evidenciado pouco antes do início da safra na região Centro-Sul. Rudorff e Batista (1985) analisaram dados espectrais do sensor MSS de cinco passagens do satélite Landsat e concluíram que a melhor época para aquisição de imagens para fins de estimativa de produtividade (relação da resposta espectral com peso dos colmos) se situa em torno do mês de fevereiro; isto ocorre pelo fato de a biomassa encontrar-se bem desenvolvida, devendo entrar no período de maturação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em uma extensão territorial do município de Barrinha, em uma área comercial sucroenergética, com 213,2247 ha, localizada no nordeste do Estado de São Paulo (Figura 1), região administrativa de Ribeirão Preto.

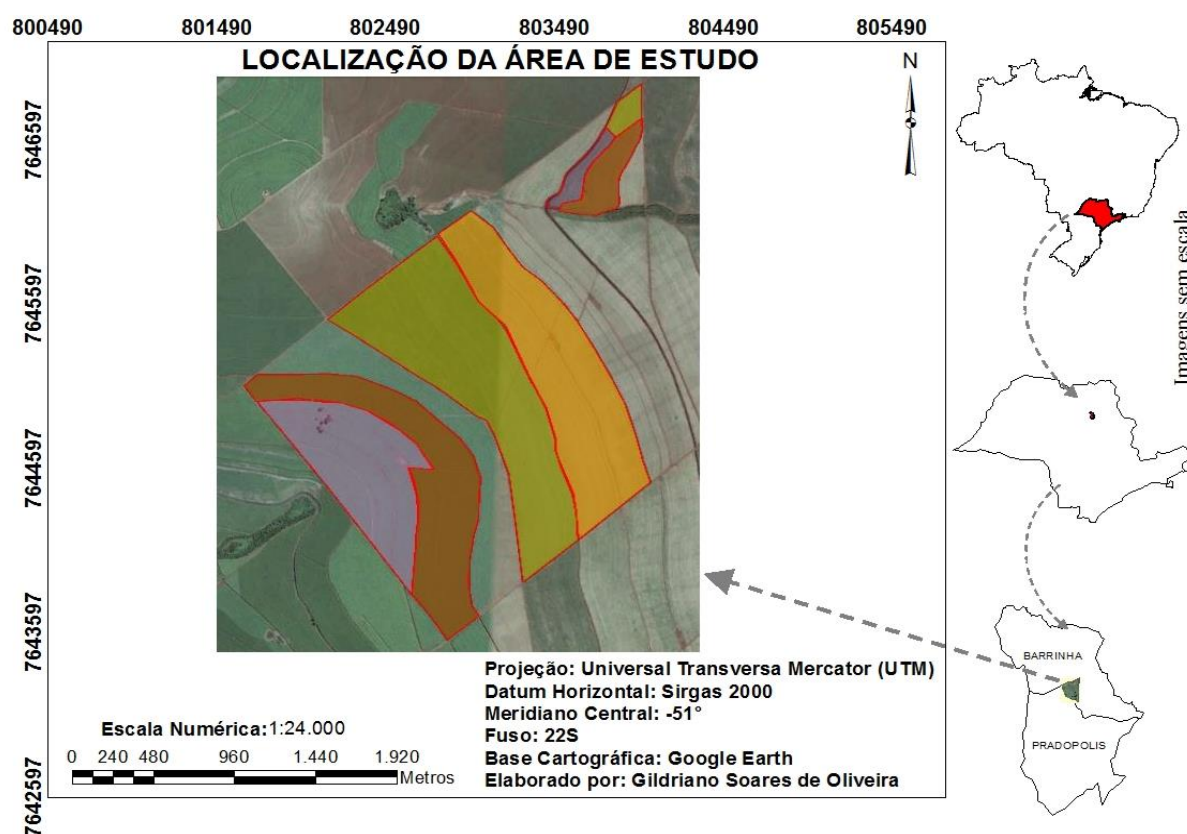


Figura 1. Localização área experimental sucroenergética.

Segundo Oliveira et al. (1999), a área é constituída pela unidade de mapeamento LV34, que diz respeito a Latossolos Vermelhos acriférricos e distroférricos A moderado textura argilosa relevo suave ondulado e plano, conforme Figura 2.

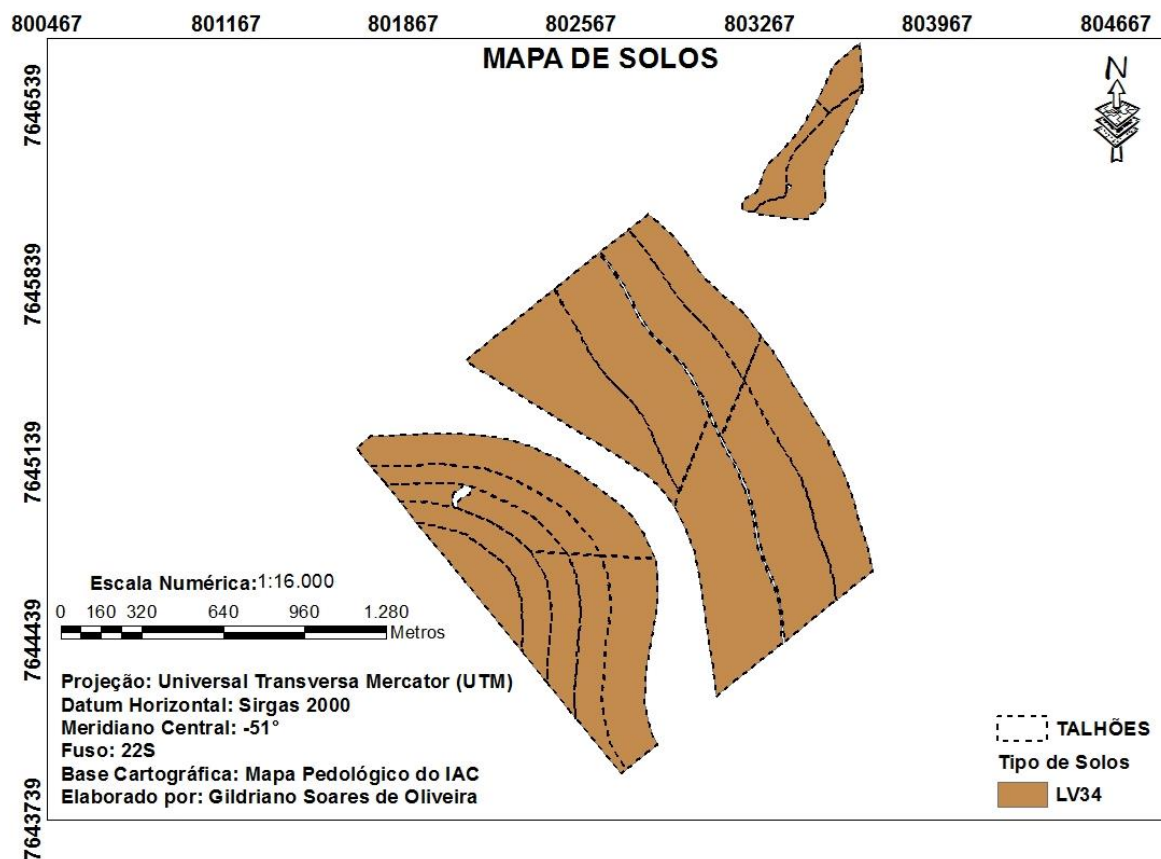


Figura 2. Mapa de solos da área comercial sucroenergética.

O clima da região, de acordo com a classificação de Koppen, é subtropical úmido, Aw, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso (Rolim et al., 2007). De acordo com a EMBRAPA (2007), a região é caracterizada por um período de 6 meses do ano com déficit hídrico e temperatura média de 22,5 °C, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Balanço Hídrico da região onde está inserida a área objeto de estudo.

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP	ARM (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	24,8	251	127	100	127	0	124
Fev	24,9	232	117	100	117	0	115
Mar	24,5	153	119	100	119	0	34
Abr	22,5	51	87	70	81	6	0
Mai	20,3	41	65	55	56	9	0
Jun	19,1	26	52	42	38	13	0
Jul	19,0	22	52	31	33	19	0
Ago	20,9	15	69	18	28	41	0
Set	22,5	40	86	11	47	39	0
Out	23,4	112	103	20	103	0	0
Nov	23,9	149	111	58	111	0	0
Dez	24,3	216	124	100	124	0	50
TOTAIS	270,1	1.308	1.113	705	985	128	323
MÉDIAS	22,5	109	93	59	82	11	27

3.2 METODOLOGIA

A avaliação da estimativa da produtividade de biomassa de cana-de-açúcar por sensores remotos foi realizada pela modelagem matemática da produtividade (variável dependente) em função do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI – variável independente), para 4 variedades, conforme mostra a Figura 3, (IAC91-2195, RB925345, SP90-1107 e SP91-1285) em 4 idades de plantas (7, 8, 9 e 10 meses após o corte) para as safras 2012/2013 e 2013/2014.

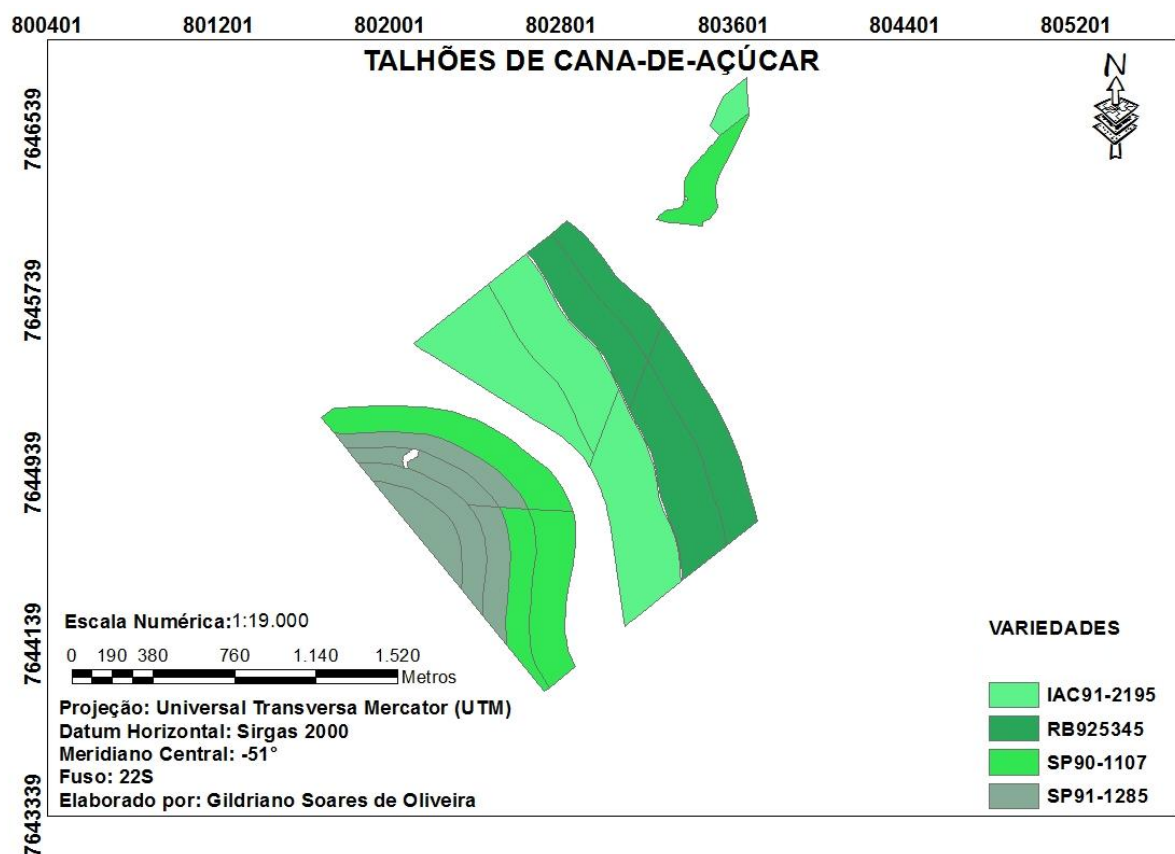


Figura 3. Mapa das variedades existentes na área comercial sucroenergética.

A produtividade real de biomassa de cana-de-açúcar foi obtida dos talhões de cana-de-açúcar. Os dados de produtividade foram cedidos do banco de dados da unidade experimental sucroenergética, do ano de 2012/2013 e 2013/2014, bem como o mapeamento georreferenciado dos talhões com as variedades.

Os NDVIs foram obtidos por meio de imagens multiespectrais do satélite Landsat 8 (USGS,2015), sensor OLI_TIRS (*Operational Land Imager_Thermal Infrared Sensor*), usando as bandas do vermelho (B4) e do infravermelho próximo (B5), de resolução geométrica ou espacial de 30 metros, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Características do sensor orbital do satélite utilizado.

Satélite/Sensor	Bandas espectrais	Resolução espectral	RG	RT	FI	RR
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1 - Ultra Azul	0.43 - 0.45 µm	30 m			
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51 µm	30 m			
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59 µm	30 m			
	Banda 4 - Vermelho	0.64 - 0.67 µm	30 m			
	Banda 5 -Infravermelho Próximo (NIR)	0.85 - 0.88 µm	30 m			
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65 µm	30 m	16	185	16
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29 µm	30 m	dias	km	bits
	Banda 8 - Pancromática	0.50 - 0.68 µm	15 m			
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38 µm	30 m			
	Banda 10 - Infravermelho Termal (TIRS) 1	10.60 - 11.19 µm	100 m			
	Banda 11 - Infravermelho Termal (TIRS) 2	11.50 - 12.51 µm	100 m			

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) utilizado para estimativa da produtividade de biomassa (JENSEN, 2009), é calculado pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{\rho\lambda_{NIR} - \rho\lambda_R}{\rho\lambda_{NIR} + \rho\lambda_R} \dots\dots\dots(16)$$

sendo:

NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada;

$\rho\lambda_{NIR}$ – reflectância no topo da atmosfera do infravermelho corrigida com o ângulo solar;

$\rho\lambda_R$ – reflectância no topo da atmosfera do vermelho corrigida com o ângulo de elevação solar.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{SE})} \dots\dots\dots(17)$$

sendo:

ρ_{λ} – reflectância no topo da atmosfera corrigida com o ângulo de elevação solar;

$\rho_{\lambda'}$ – reflectância no topo da atmosfera sem a correção com o ângulo de elevação solar;

θ_{SE} – ângulo de elevação solar.

O cálculo da reflectância no topo da atmosfera sem a correção com o ângulo de elevação solar foi determinado a partir da seguinte expressão:

$$\rho_{\lambda'} = M_p \cdot Q_{cal} + A_p \dots\dots\dots(18)$$

sendo:

$\rho_{\lambda'}$ – reflectância no topo da atmosfera sem a correção com o ângulo solar;

M_p – fator de correção multiplicativo específico da banda;

Q_{cal} – número digital do pixel quantizado e calibrado;

A_p – fator de correção aditivo específico da banda.

Na Tabela 3, estão apresentados os valores de M_p , A_p e θ_{SE} de cada cena utilizada, bem como as datas de passagens do satélite.

Tabela 3. Cenas, datas de passagem e valores de M_p , A_p e θ_{SE} , das imagens do satélite LANDSAT 8, utilizadas nos cálculos dos NDVI's

Imagem	Data	Banda	M_p	A_p	θ_{SE}
LC82200752013139LGN01	19/05/2013	B4	0,00002	-0,1	39,91586331
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752013187LGN00	06/07/2013	B4	0,00002	-0,1	36,55446761
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752013219LGN00	07/08/2013	B4	0,00002	-0,1	41,4214503
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752013251LGN00	08/09/2013	B4	0,00002	-0,1	50,71329994
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752014158LGN00	07/06/2014	B4	0,00002	-0,1	36,92375172
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752014222LGN00	10/08/2014	B4	0,00002	-0,1	41,77481168
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752014254LGN00	11/09/2014	B4	0,00002	-0,1	51,27996097
		B5	0,00002	-0,1	
LC82200752014286LGN00	13/10/2014	B4	0,00002	-0,1	60,87259866
		B5	0,00002	-0,1	

M_p – fator de correção multiplicativo específico da banda, A_p – fator de correção aditivo específico da banda, θ_{SE} – ângulo de elevação solar.

Para que fosse possível obter a imagem NDVI nas plantas com 7, 8, 9 e 10 meses, foram selecionadas imagens com datas de passagem que permitissem, pelo menos, a obtenção de quatro medidas nas respectivas idades após a colheita. Ao todo, foram necessárias a seleção de oito imagens em datas distintas ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, que permitiu a obtenção dos dados (Figura 4).

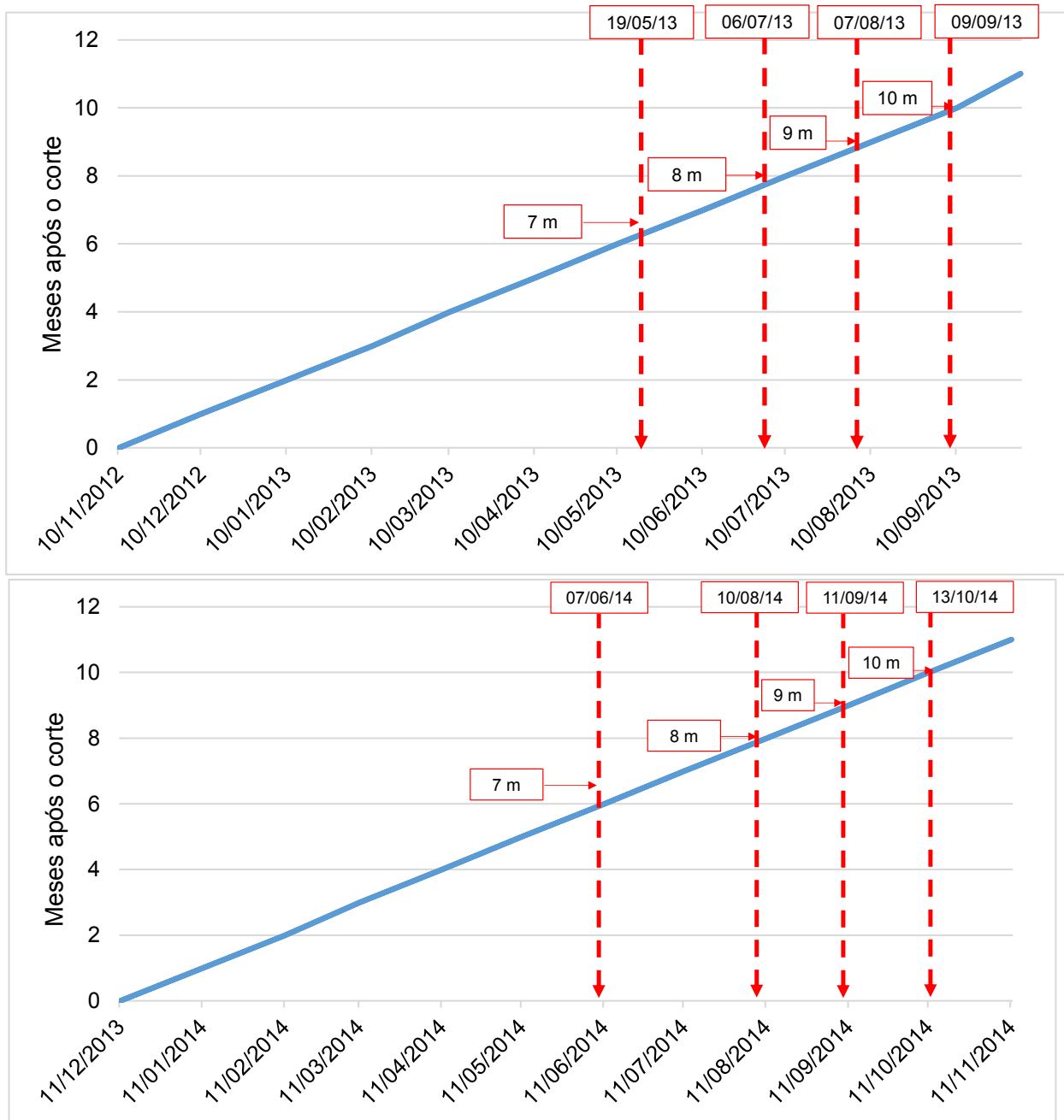


Figura 4. Evolução mensal da cultura após a colheita e as respectivas datas das imagens selecionadas para os dois anos agrícolas.

Para todas as imagens de NDVI de cada data, realizou-se o cálculo do valor médio de NDVI dos pixels dentro da área de cada talhão, por meio de correlação cruzada, já que a produtividade real é dada por talhões, permitindo a obtenção dos pares produtividade de biomassa e NDVI médio do talhão.

Em seguida, com os pares de produtividades de biomassa reais das 4 variedades nas 4 idades de planta (variáveis dependentes) e das médias dos valores de NDVI para o respectivo talhão (variáveis independentes), realizou-se a análise de variância da regressão linear para todas as variedades nas diferentes idades de plantas para os dois anos agrícolas.

Os dados de produtividade de biomassa estimada de cana-de-açúcar por talhão por idade da planta foram convertidos para produtividade de biomassa estimada de cana-de-açúcar média por talhão. A produtividade real média por talhão foi determinada diretamente por meio da pesagem na ocasião da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Em seguida foi realizada a classificação dos coeficientes de correlação de acordo com Hopkins (2000), segundo Tabela 4.

Tabela 4. Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação.

Coeficiente de Correlação (R + ou -)	Correlação
0,0-0,1	Muito baixa
0,1-0,3	Baixa
0,3-0,5	Moderada
0,5-0,7	Alta
0,7-0,9	Muito alta
0,9-1,0	Quase perfeita

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A plataforma do ArcGis 10 (ESRI, 2008), que se baseia na estrutura de três aplicativos: ArcCatalog, ArcMap e ArcToolbox permite o desempenho da gestão de dados geográficos, da cartografia, da análise espacial e da edição avançada de dados ou a ligação à base de dados externos obtidos na área de desenvolvimento do sistema produtivo de cana-de-açúcar.

Com as produtividades reais (variável dependente) e os valores médios do NDVI (variável independente) foram realizadas as análises de regressão estatísticas para obter os melhores modelos na estimativa da produtividade, nas quatro fases de desenvolvimento.

A seleção do modelo de melhor desempenho foi realizada a partir do nível de significância estatística da análise de variância (valor de p), associado ao coeficiente de determinação de ajuste do modelo (valor de R^2) e classificado de acordo com o coeficiente de correlação (R).

Em seguida, a partir do melhor modelo, converteram-se as imagens NDVI em produtividade esperada.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* SPSS 17 (SPSS Inc., 2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fase que apresenta alta correlação entre a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, para os talhões com as respectivas variedades foi aos 8 meses de idade, após a colheita da safra 2012/2013 (Figura 5). Aos 7 meses da mesma safra, a correlação foi moderada. Aos 7, 8, 9 e 10 meses, após o corte da safra de 2013/2014 houve correlação moderada. Entretanto aos 9 e 10 meses (2012/2013) a correlação foi baixa (Figura 5).

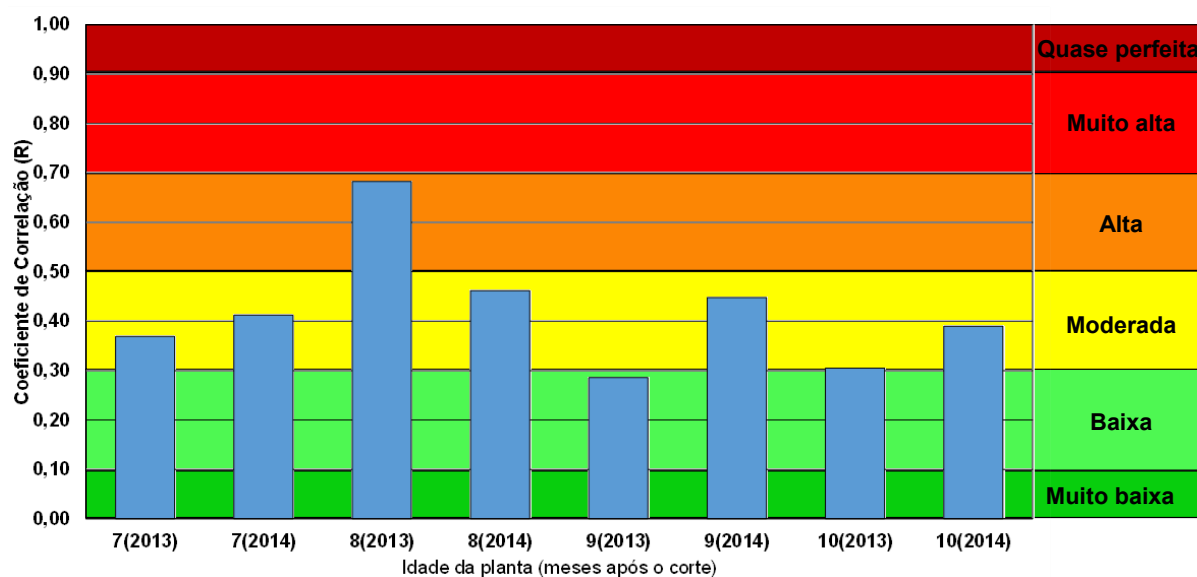


Figura 5. Correlação entre produtividade de biomassa de cana-de-açúcar e NDVI nos períodos 7, 8, 9 e 10, nos dois anos agrícolas (2013/2014).

Nota-se que, a variedade que apresentou melhor correlação (quase perfeita) entre a produtividade de biomassa e NDVI foi a SP90-1107, tanto para safra de 2012/2013 (7, 8, 9 meses), quanto para a safra 2013/2014 (7 meses) (Figura 6).

A cultivar IAC91-2195 apresentou correlação quase perfeita aos 10 meses de idade para 2012/2013. A SP90-1107 obteve correlação muito alta aos 8 meses para 2013/2014. Contudo, aos 9 e 10 meses, em 2013/2014, para a variedade SP91-1285 houve o coeficiente de correlação alta (Figura 6).

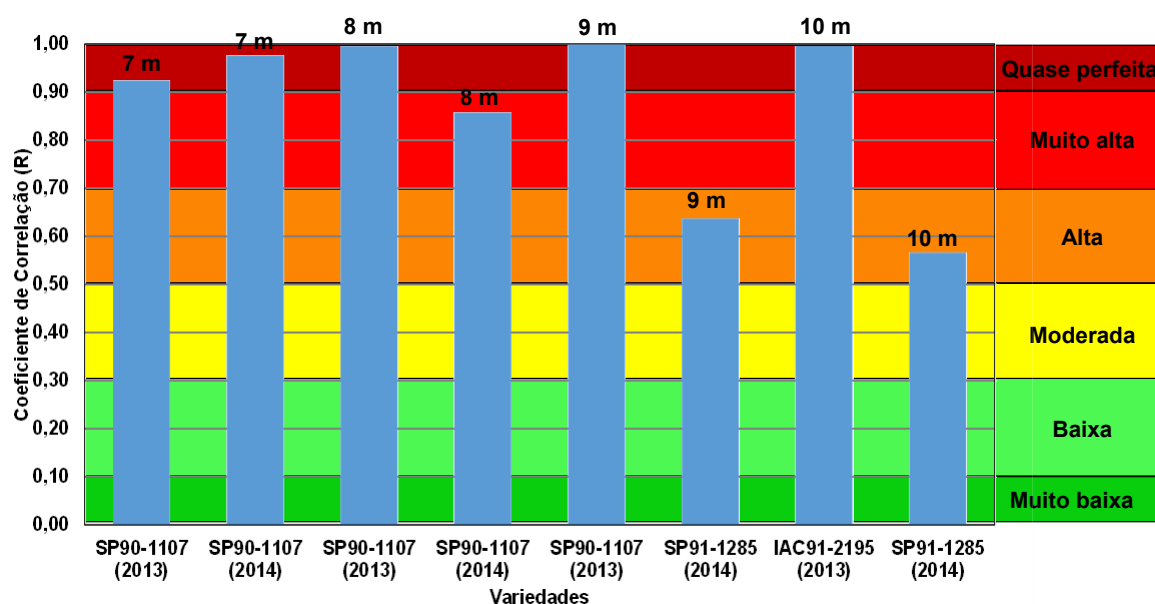


Figura 6. Correlação entre produtividade de biomassa de cana-de-açúcar e NDVI, para a melhor variedade, nos períodos 7, 8, 9 e 10, nos dois anos agrícolas (2013/2014).

A melhor significância estatística de resposta obtida pela produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculada aos 7 meses de idade da planta, na safra 2012/2013, foi pelo modelo exponencial cujo nível de significância foi $p=0,133$.

A equação foi $Y = 16,795e^{2,3749NDVI}$, com $R^2 = 0,136$ e $R = 0,369$ (Tabela 5 e Gráfico 1).

Tabela 5. Resultado da análise de regressão aos 7 meses de idade para a safra de 2012/2013.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,139	0,132	0,363
Logarítmico	0,136	0,133	0,365
Quadrático	0,297	0,150	0,387
Potência	0,135	0,134	0,366
Exponencial	0,133	0,136	0,369

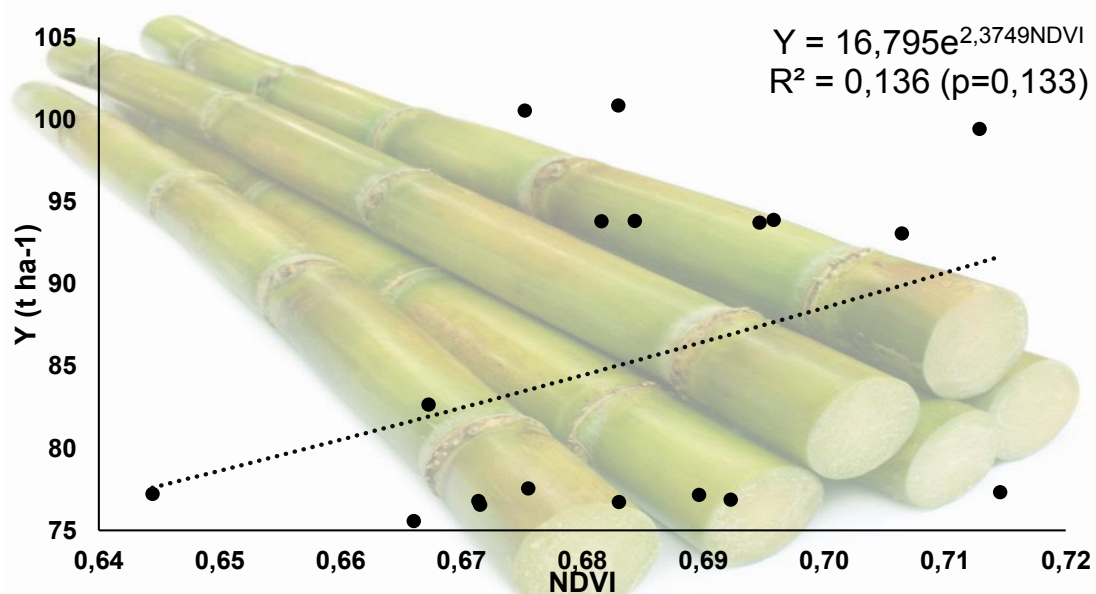


Gráfico 1. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para a safra 2012/2013.

Aos 7 meses, a variedade SP90-1107 que apresentou melhor significância estatística de resposta obtida pela produtividade de biomassa, em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2012/2013, foi pelo modelo exponencial, cujo nível de significância $p=0,076$.

A equação é dada por $Y = 0,1665e^{8,9245NDVI}$, com $R^2 = 0,853$ e $R = 0,924$, conforme Gráfico 2.

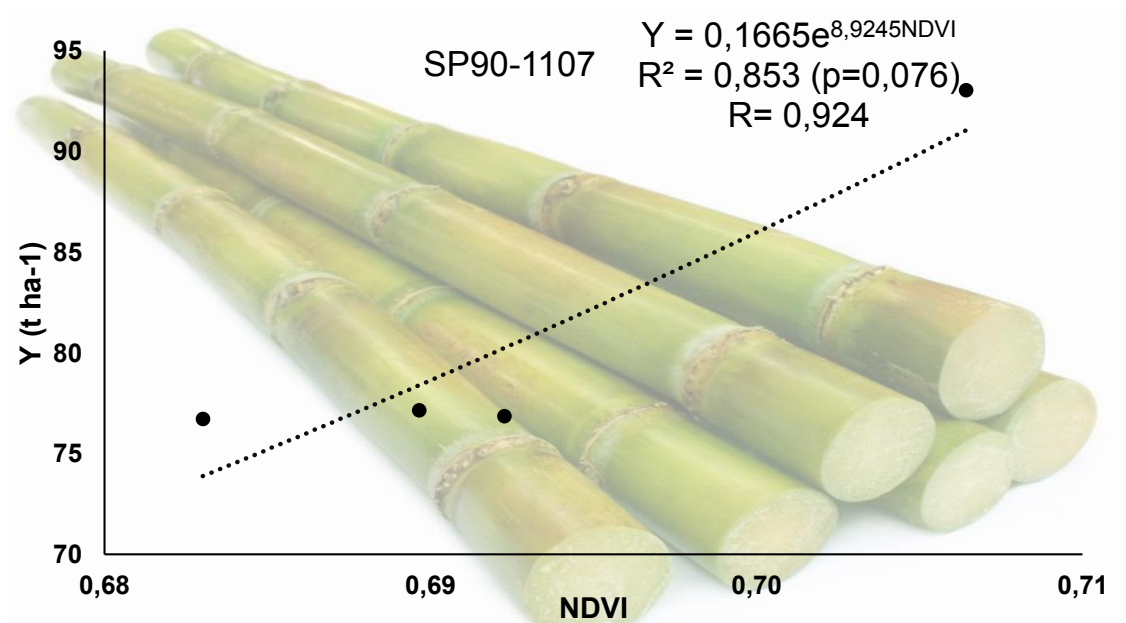


Gráfico 2. Produtividade biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2012/2013.

Na área comercial sucroenergética o NDVI variou de 0,13 a 0,77 e produtividade (Y) entre 34,62 e 106,51 t ha⁻¹, conforme pode ser observado na Figura 7, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

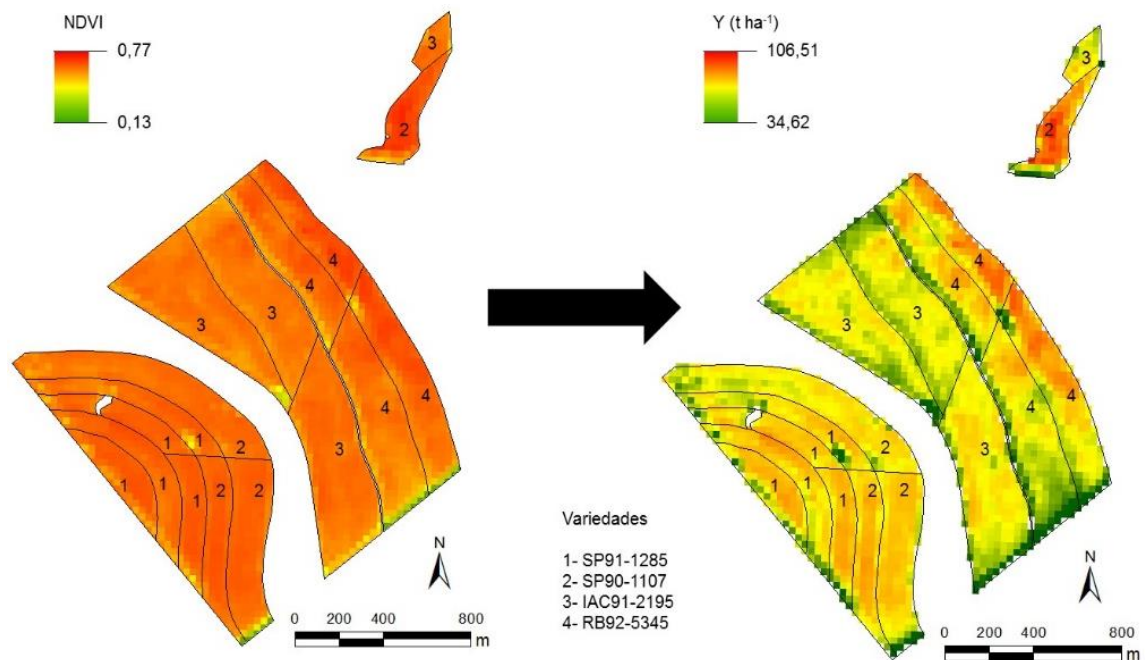


Figura 7. Transformação de imagem NDVI aos 7 meses de idade da planta em Produtividade biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.

A melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculado aos 7 meses de idade da planta, na safra 2013/2014, foi pelo modelo potencial, cujo nível de significância $p=0,089$.

A equação foi $Y = 101,5NDVI^{0,9536}$ com $R^2 = 0,170$ e $R = 0,412$ (Tabela 6 e Gráfico 3).

Tabela 6. Resultado da análise de regressão aos 7 meses de idade para a safra de 2013/2014.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,095	0,164	0,405
Logarítmico	0,093	0,166	0,407
Quadrático	0,242	0,172	0,415
Potência	0,089	0,170	0,412
Exponencial	0,091	0,168	0,410

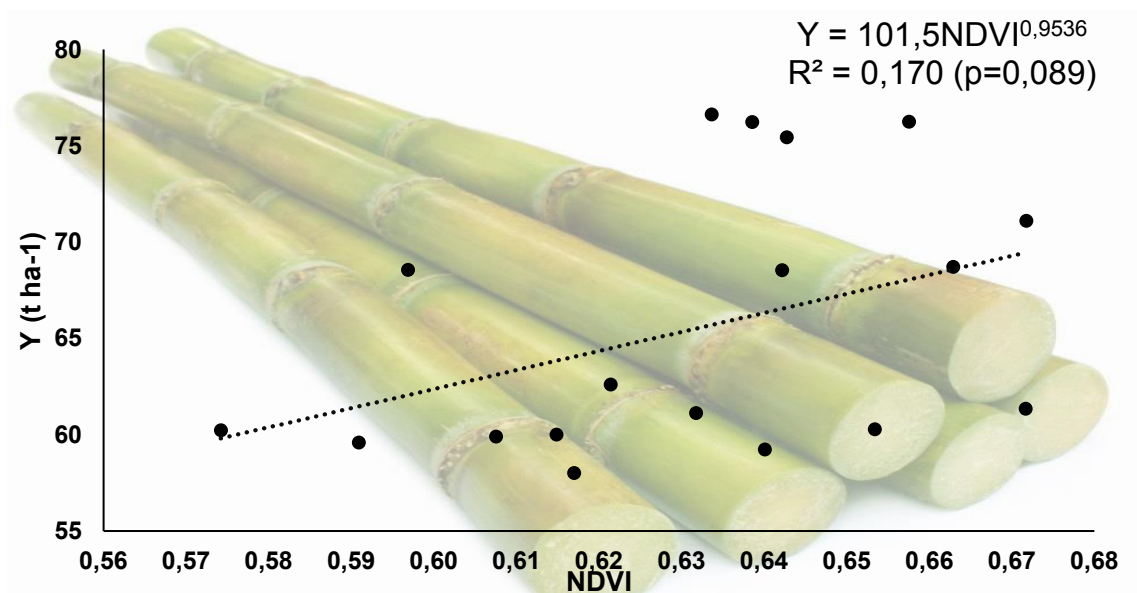


Gráfico 3. Produtividade biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para a safra 2013/2014.

Aos 7 meses, a variedade SP90-1107 que apresentou melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2013/2014, foi pelo modelo quadrático, cujo nível de significância $p=0,218$.

A equação é dada por $Y = 5333,9\text{NDVI}^2 - 6600,8\text{NDVI} + 2097,7$ com $R^2 = 0,952$ e $R = 0,976$, conforme Gráfico 4.

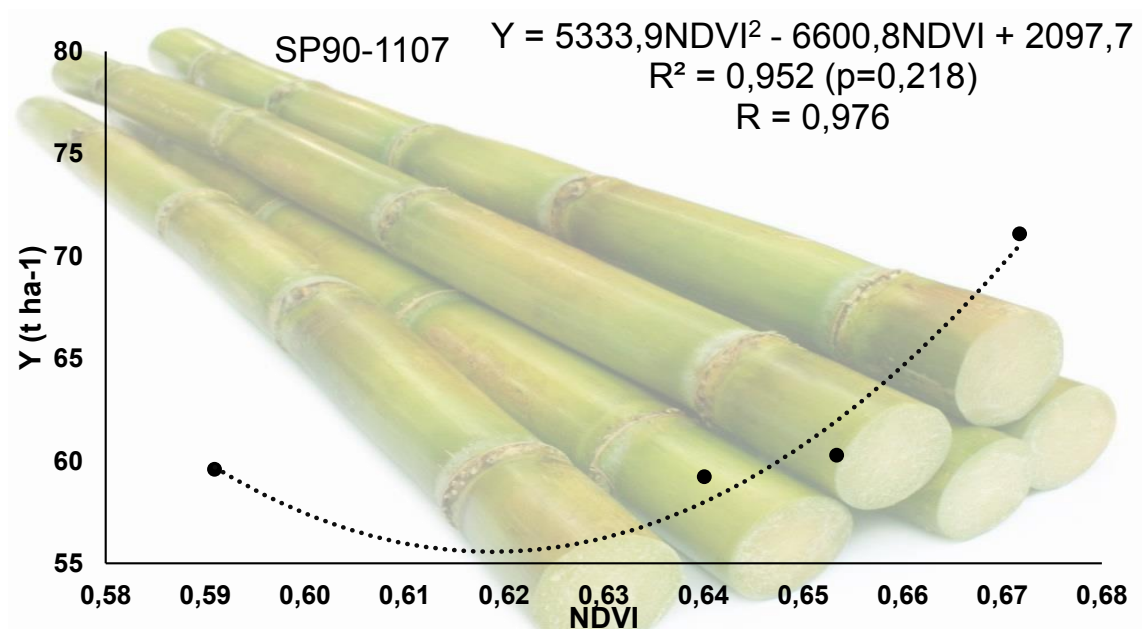


Gráfico 4. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 7 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2013/2014.

Na área comercial sucroenergética, o NDVI variou de 0,15 a 0,73 e produtividade (Y) entre 29,87 e 73,95 t ha⁻¹, conforme mostra a Figura 8, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

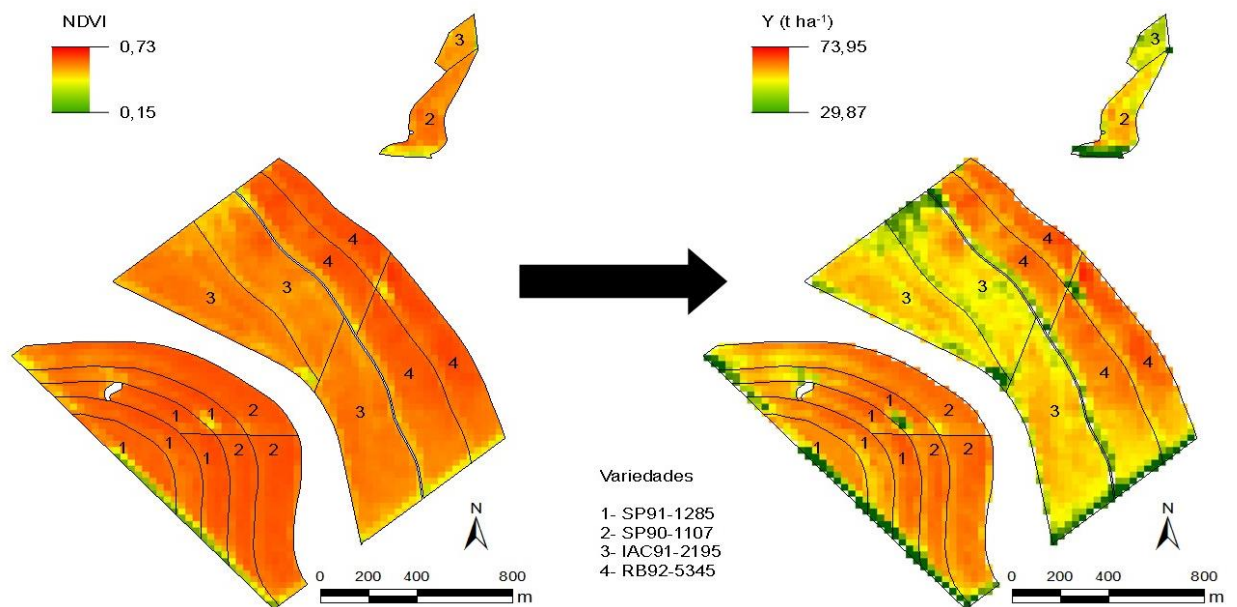


Figura 8. Transformação de imagem NDVI aos 7 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.

A melhor significância estatística de resposta obtida pela produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculados aos 8 meses de idade da planta, na safra 2012/2013, foi pelo modelo exponencial, cujo nível de significância $p=0,002$.

A equação foi $Y = 3823,3e^{-5,646NDVI}$ com $R^2 = 0,466$ e $R = 0,683$ (Tabela 7 e Gráfico 5).

Tabela 7. Resultado da análise de regressão aos 8 meses de idade para a safra de 2012/2013.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,002	0,450	0,671
Logarítmico	0,002	0,447	0,669
Quadrático	0,002	0,454	0,674
Potência	0,002	0,462	0,680
Exponencial	0,002	0,466	0,683

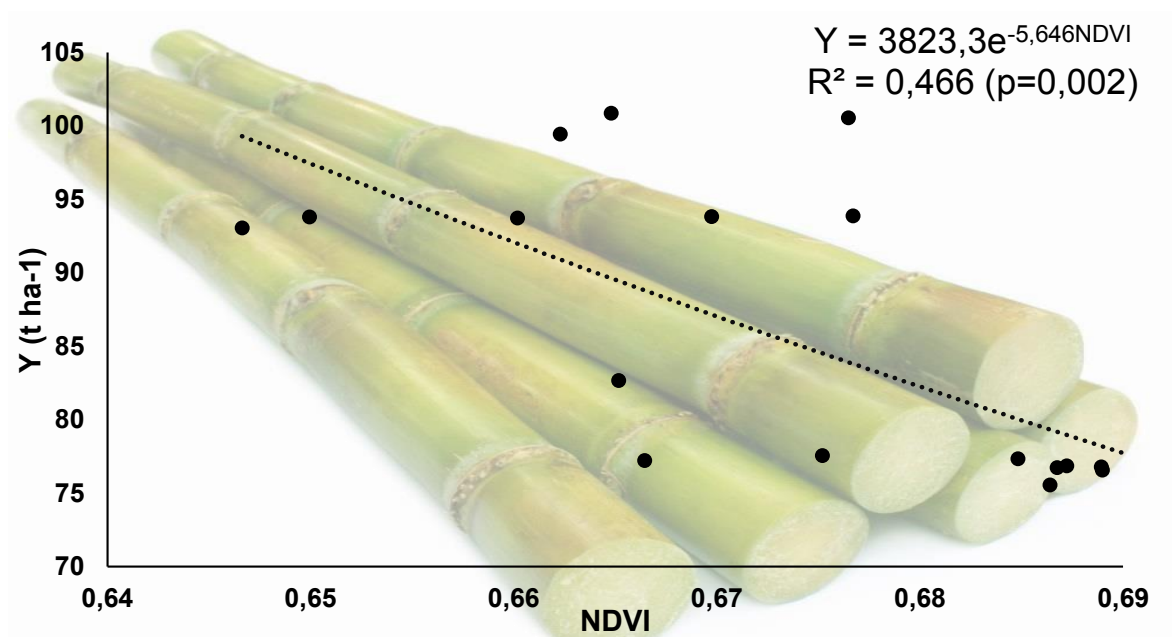


Gráfico 5. Produtividade biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para a safra 2012/2013.

Aos 8 meses, a variedade SP90-1107 que apresentou a melhor significância estatística de resposta obtida pela produtividade biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2012/2013, foi pelo modelo logarítmico, cujo nível de significância $p=0,005$.

A equação é dada por $Y = -257,1\ln(\text{NDVI}) - 19,133$ com $R^2 = 0,999$ e $R = 0,995$, conforme Gráfico 6.

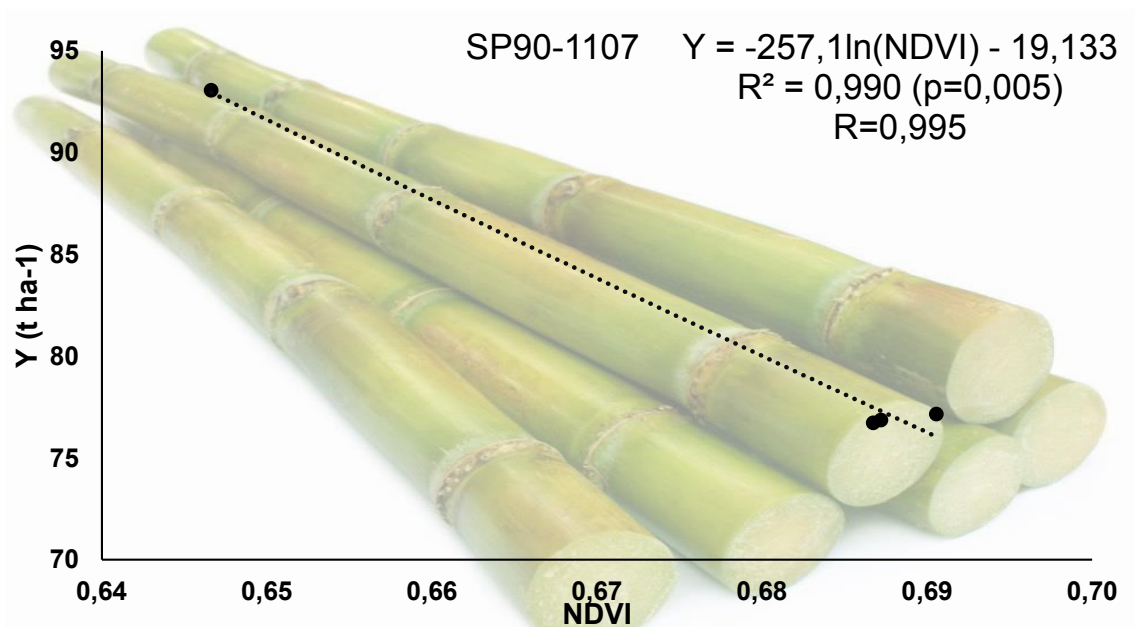


Gráfico 6. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2012/2013.

Na área comercial sucroenergética, o NDVI variou de -0,49 a 0,82 e a produtividade (Y) entre 54,14 e 78,89 t ha⁻¹, conforme pode ser observado na Figura 9, na conversão de NDVI em produtividade, pelo modelo exponencial.

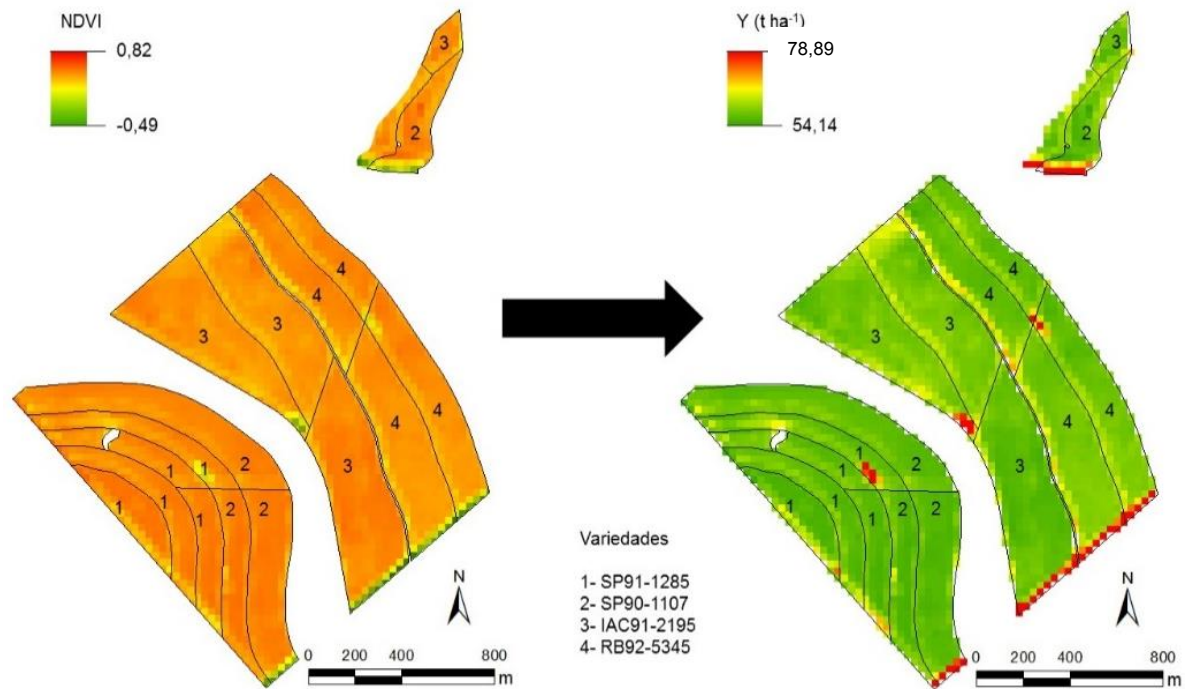


Figura 9. Transformação de imagem NDVI aos 8 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.

A melhor significância estatística de resposta obtida pela produtividade de biomassa, em função dos índices de vegetação (NDVI) calculados aos 8 meses de idade da planta, na safra 2013/2014, foi pelo modelo exponencial, cujo nível de significância $p=0,054$.

A equação foi $Y = 31,986e^{1,2071NDVI}$ com $R^2 = 0,213$ e $R = 0,462$ (Tabela 8 e Gráfico 7).

Tabela 8. Resultado da análise de regressão aos 8 meses de idade para a safra de 2013/2014.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,055	0,211	0,459
Logarítmico	0,055	0,211	0,459
Quadrático	0,168	0,211	0,459
Potência	0,054	0,212	0,460
Exponencial	0,054	0,213	0,462

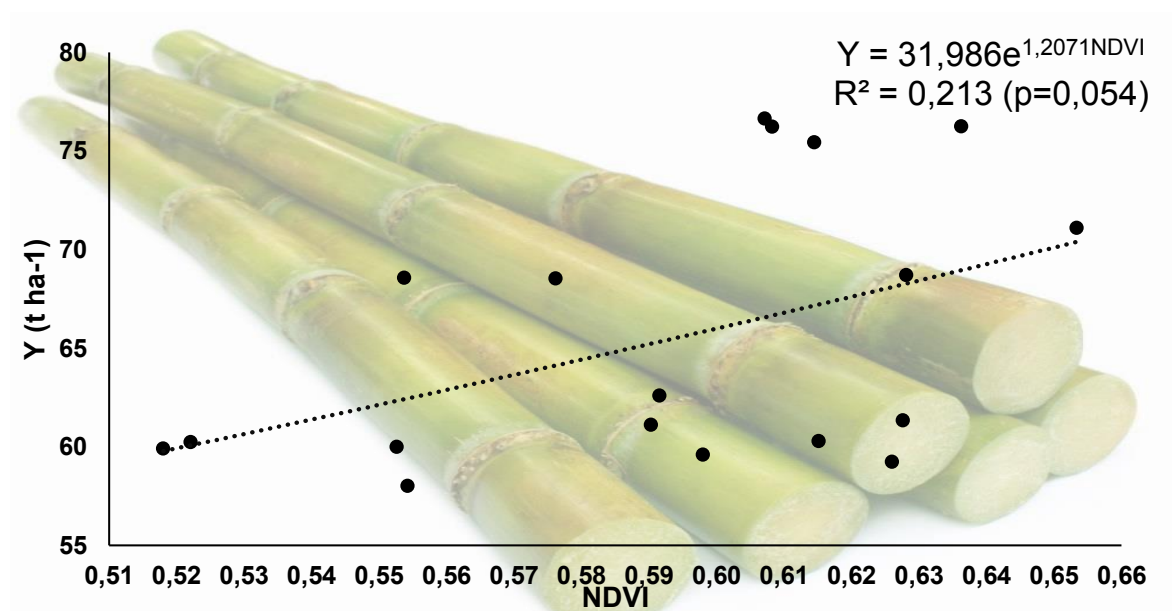


Gráfico 7. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para a safra 2013/2014.

Aos 8 meses, a variedade SP90-1107 que apresentou a melhor significância estatística de resposta obtida pela produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2013/2014, foi pelo modelo linear, cujo nível de significância $p=0,143$.

A equação é dada por $Y = 210,98\text{NDVI} - 68,916$, com $R^2 = 0,734$ e $R = 0,857$, conforme Gráfico 8.

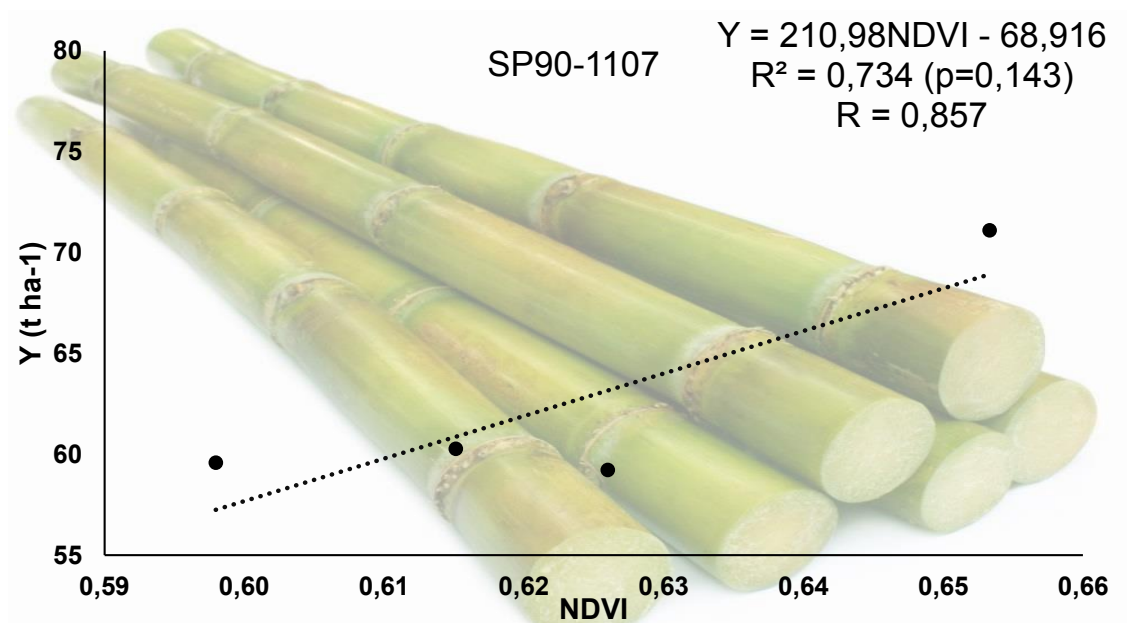


Gráfico 8. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 8 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2013/2014.

Na área comercial sucroenergética o NDVI variou de 0,10 a 0,75 e produtividade (Y) entre 40,96 e 74,15 t ha⁻¹, conforme mostra a Figura 10, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

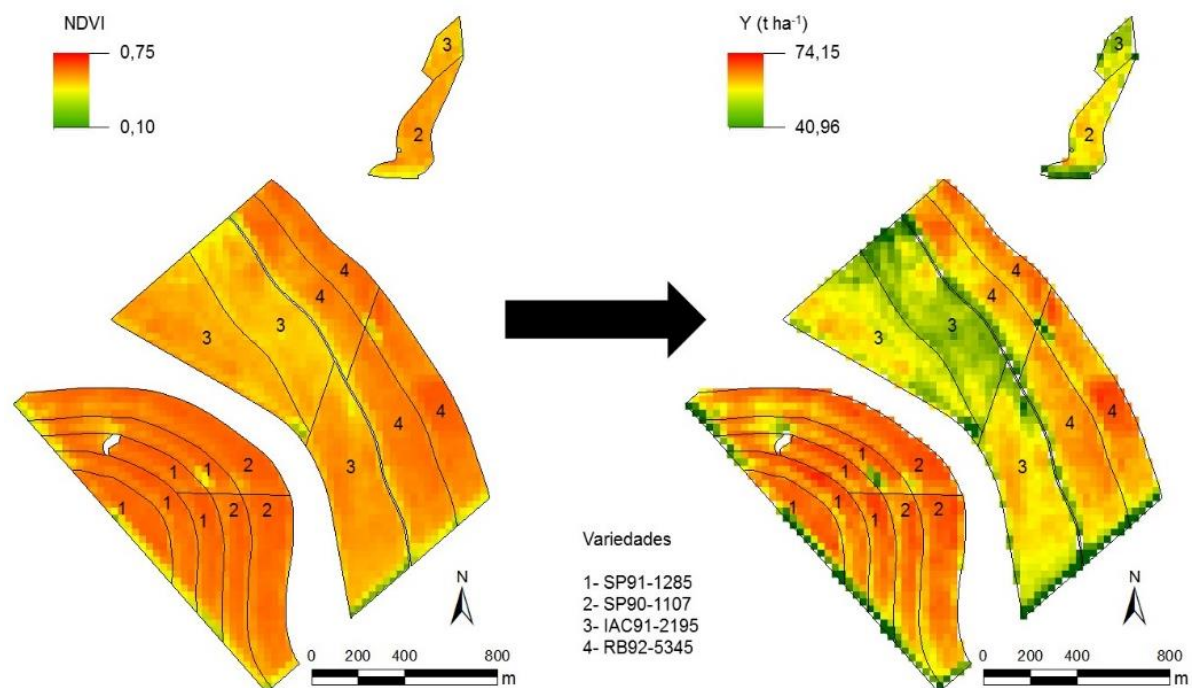


Figura 10. Detalhe da transformação de imagem NDVI aos 8 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.

A melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculados aos 9 meses de idade da planta, na safra 2012/2013, foi pelo modelo exponencial, cujo nível de significância $p=0,249$.

A equação foi $Y = 41,848e^{1,2482NDVI}$ com $R^2 = 0,082$ e $R = 0,286$ (Tabela 9 e Gráfico 9).

Tabela 9. Resultado da análise de regressão aos 9 meses de idade para a safra de 2012/2013.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,256	0,080	0,283
Logarítmico	0,262	0,078	0,279
Quadrático	0,403	0,114	0,338
Potência	0,256	0,080	0,283
Exponencial	0,249	0,082	0,286

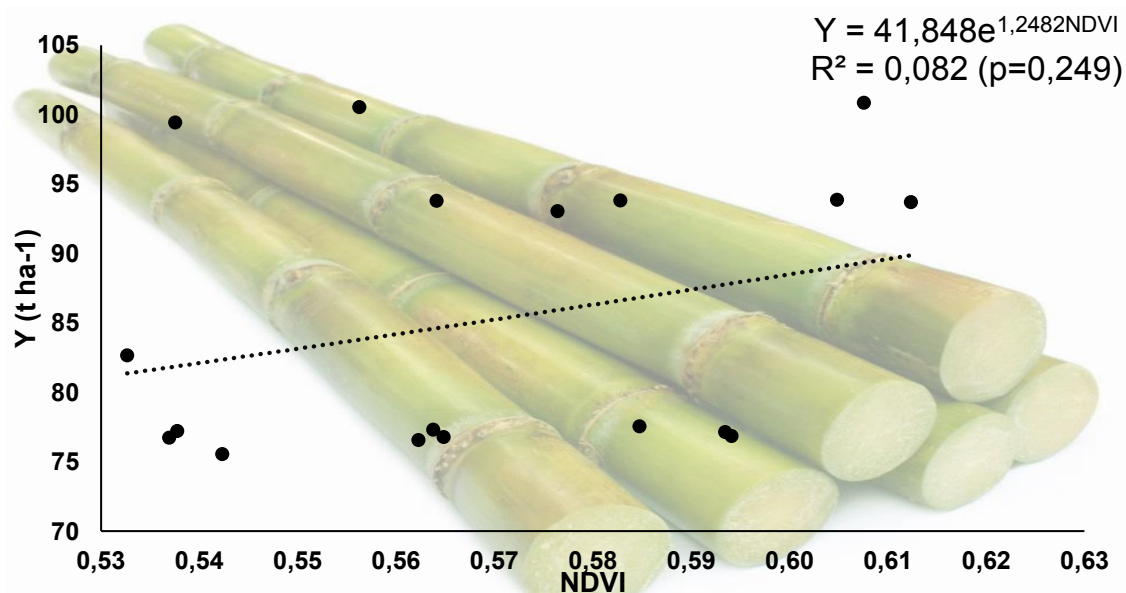


Gráfico 9. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para a safra 2012/2013.

Aos 9 meses, a variedade SP90-1107 que apresentou a melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2012/2013, foi pelo modelo quadrático, cujo nível de significância $p=0,005$.

A equação é dada por $Y = -23493\text{NDVI}^2 + 26570\text{NDVI} - 7416,4$ com $R^2 = 0,999$ e $R = 0,999$, conforme Gráfico 10.

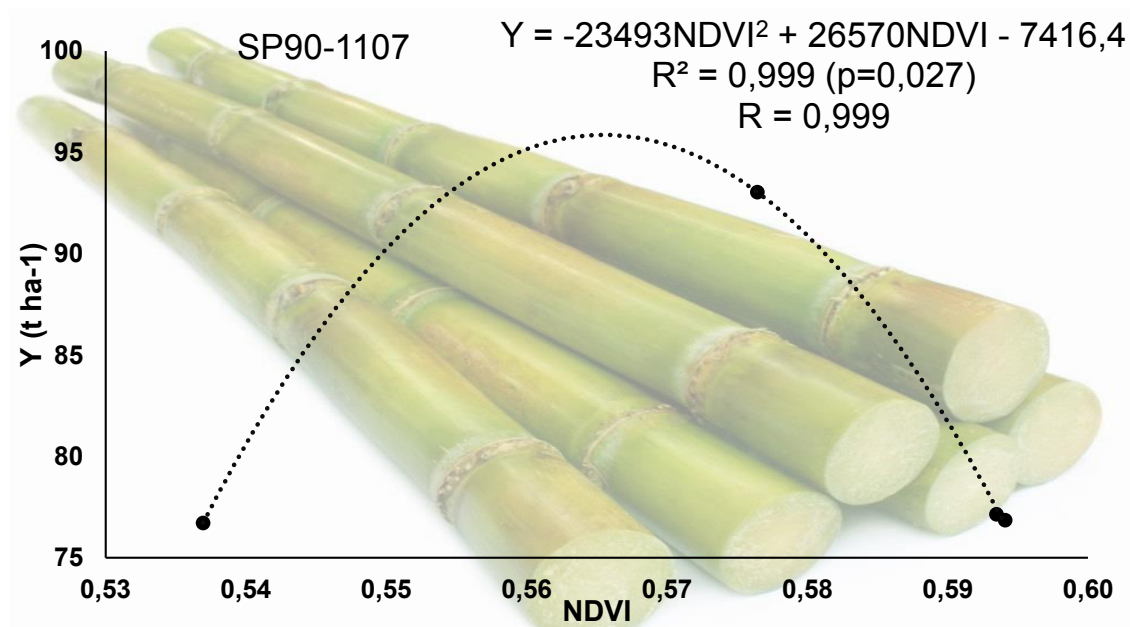


Gráfico 10. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para variedade SP90-1107 para a safra 2012/2013.

Na área comercial sucroenergética, o NDVI variou de 0,18 a 0,72 e a produtividade (Y) entre 60,59 e 97,55 t ha⁻¹, conforme mostra Figura 11, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

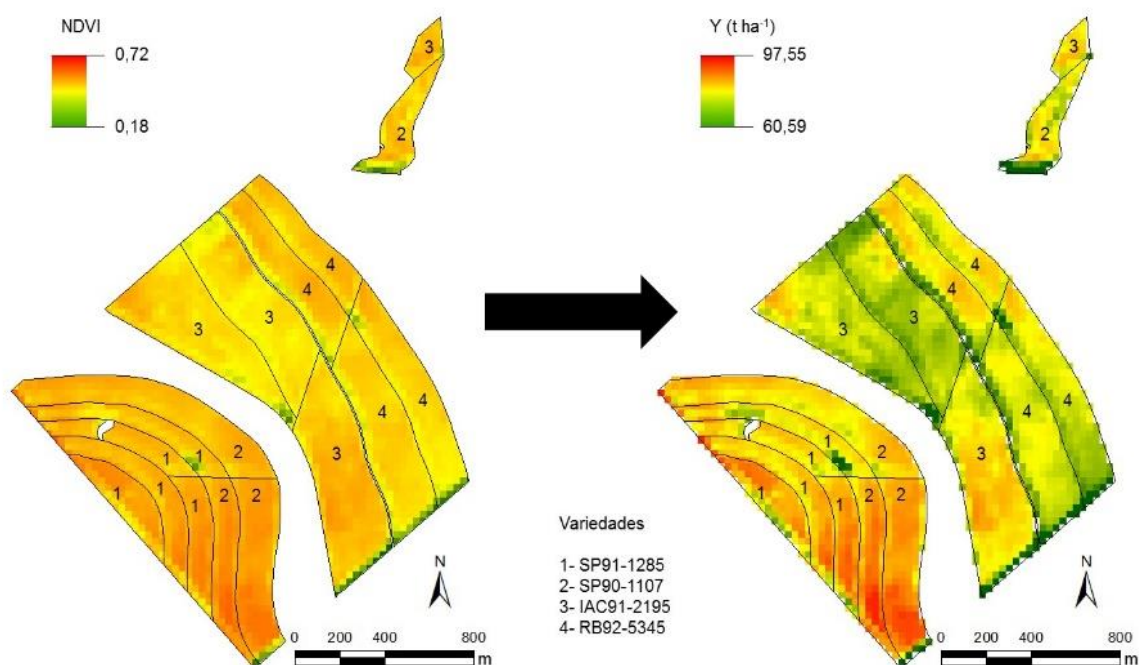


Figura 11. Transformação de imagem NDVI aos 9 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.

A melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculado aos 9 meses de idade da planta, na safra 2013/2014, foi pelo modelo linear, cujo nível de significância $p=0,062$.

A equação foi $Y = 66,723\text{NDVI} + 31,399$ com $R^2 = 0,201$ e $R = 0,448$ (Tabela 10 e Figura 11).

Tabela 10. Resultado da análise de regressão aos 9 meses de idade para a safra de 2013/2014.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,062	0,201	0,448
Logarítmico	0,063	0,199	0,446
Quadrático	0,183	0,202	0,449
Potência	0,065	0,197	0,444
Exponencial	0,064	0,199	0,446

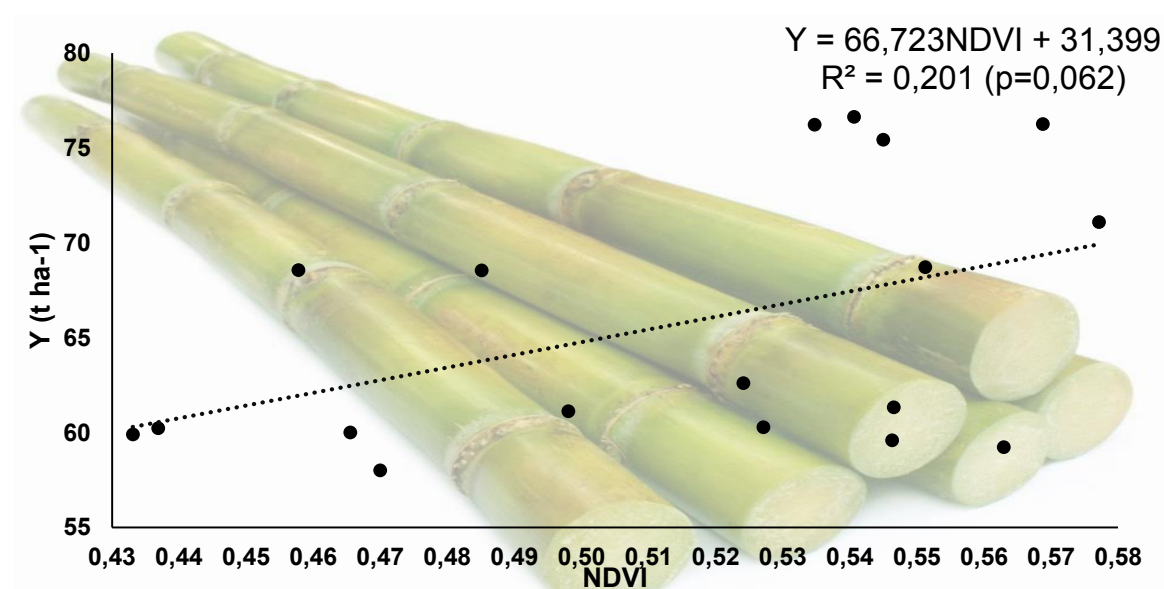


Gráfico 11. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para a safra 2013/2014.

Aos 9 meses, a variedade SP91-1285 que apresentou melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2013/2014, foi pelo modelo linear, cujo nível de significância $p=0,174$.

A equação é dada por $Y = 210,98\text{NDVI} - 68,916$, com $R^2 = 0,406$ e $R = 0,637$, conforme Gráfico 12.

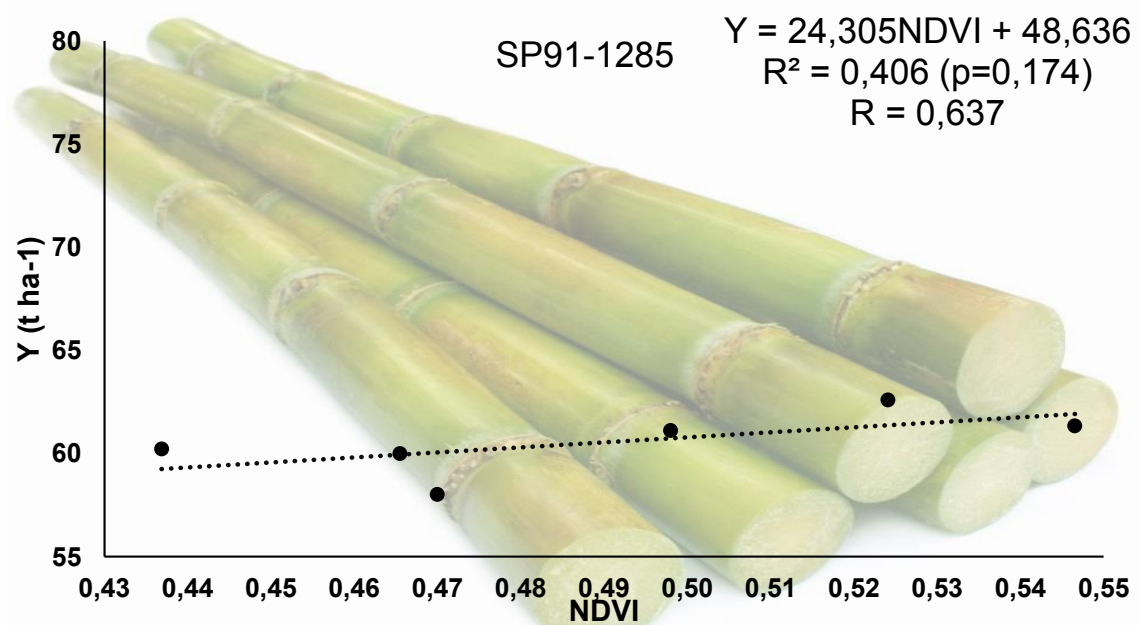


Gráfico 12. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 9 meses de idade para variedade SP91-1285 para a safra 2013/2014.

Na área comercial sucroenergética o NDVI variou de 0,05 a 0,76 e Produtividade (Y) entre 45,86 e 72,84 t ha⁻¹, conforme mostra a Figura 12, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

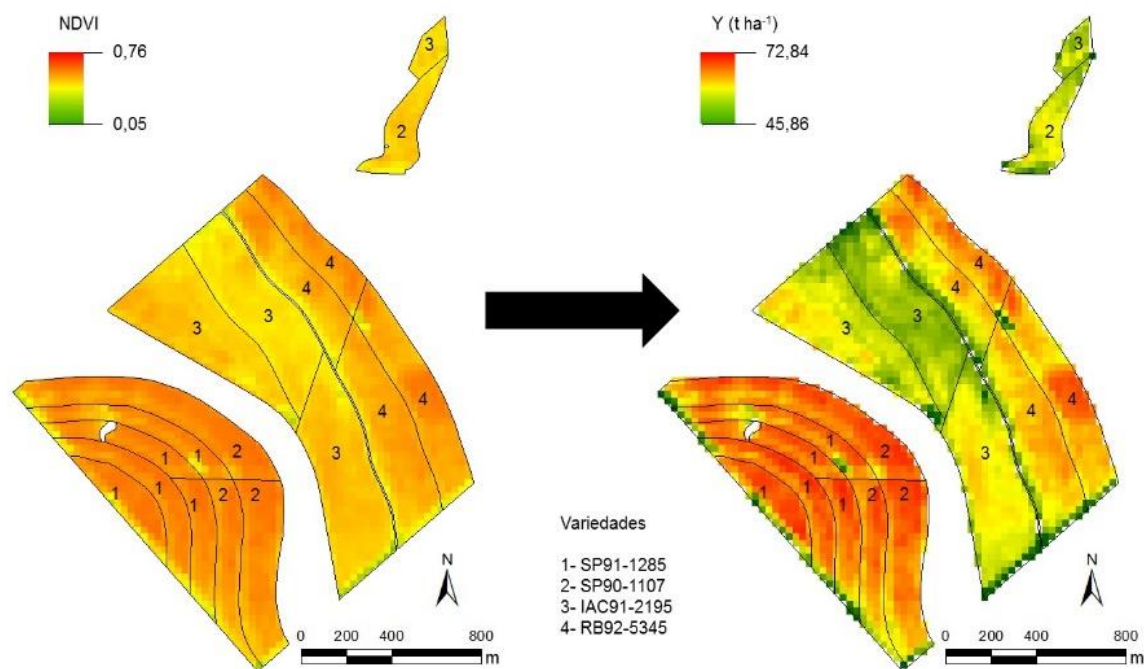


Figura 12. Transformação de imagem NDVI aos 9 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.

A significância estatística de resposta mais adequada obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculado aos 10 meses de idade da planta, na safra 2012/2013, foi pelo modelo exponencial, cujo nível de significância $p=0,219$.

A equação foi $Y = 42,158e^{1,3356NDVI}$ com $R^2 = 0,093$ e $R = 0,305$ (Tabela 11 e Gráfico 13).

Tabela 11. Resultado da análise de regressão aos 10 meses de idade para a safra de 2012/2013.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,229	0,089	0,298
Logarítmico	0,232	0,088	0,297
Quadrático	0,443	0,103	0,321
Potência	0,222	0,092	0,303
Exponencial	0,219	0,093	0,305

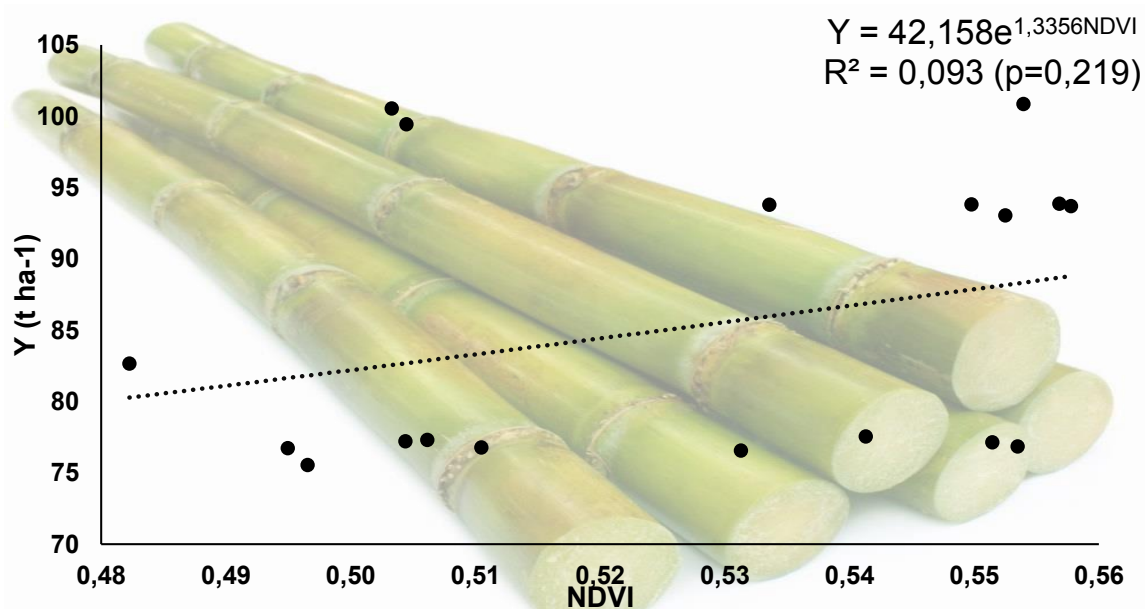


Gráfico 13. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para a safra 2012/2013.

Aos 10 meses, a variedade IAC91-2195 que apresentou melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2012/2013, foi pelo modelo quadrático, cujo nível de significância $p=0,005$.

A equação é dada por $Y = -10900\text{NDVI}^2 + 11548\text{NDVI} - 2951,5$ com $R^2 = 0,993$ e $R = 0,996$, conforme Gráfico 14.

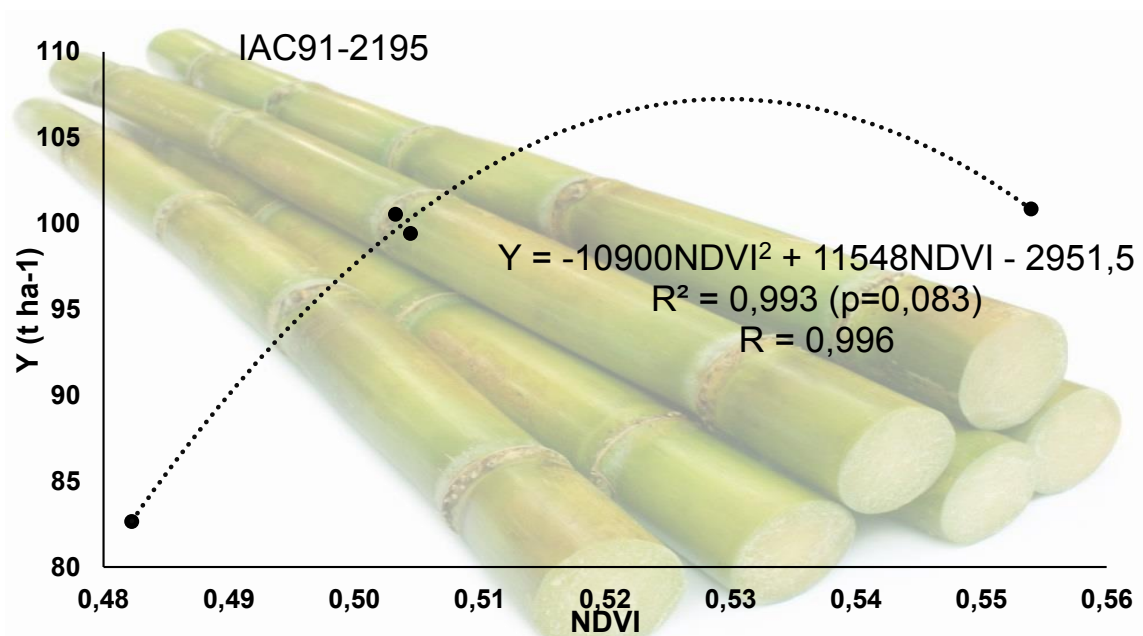


Gráfico 14. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para variedade IAC91-2195 para a safra 2012/2013.

Na área comercial sucroenergética o NDVI variou de 0,12 a 0,72 e Produtividade (Y) entre 61,97 e 99,77 t ha⁻¹, conforme mostra a Figura 13, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

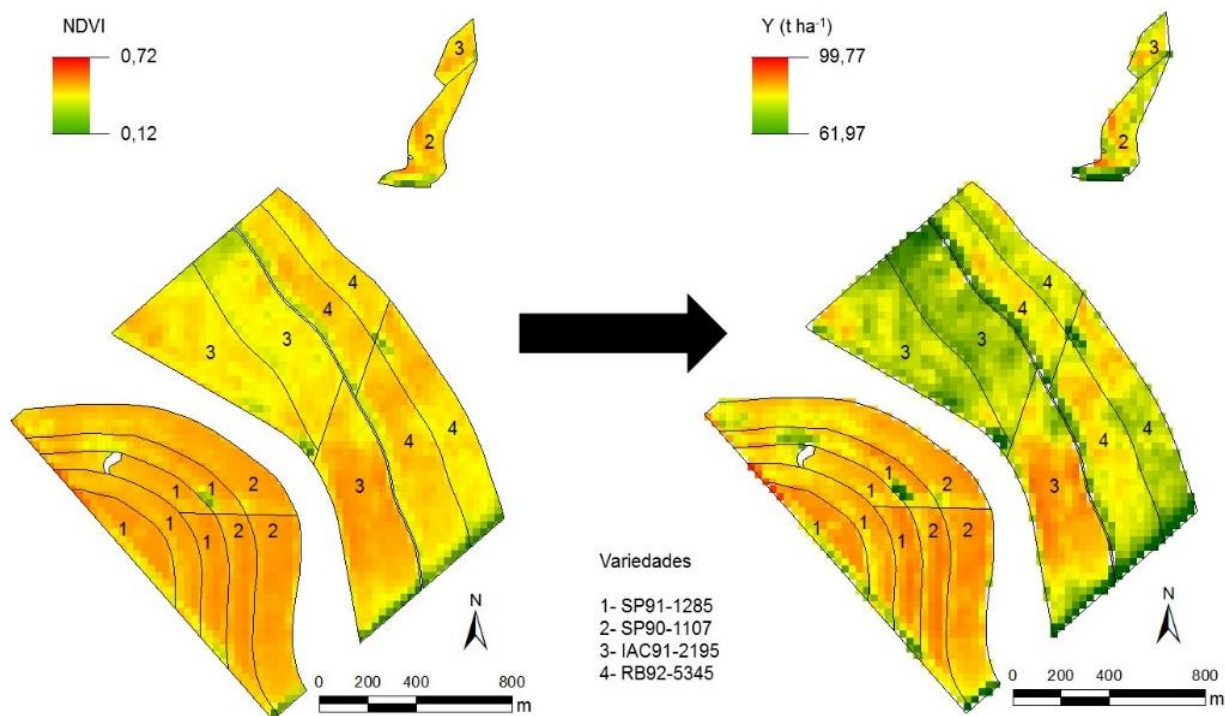


Figura 13. Transformação de imagem NDVI aos 10 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2012/2013.

A melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), calculado aos 10 meses de idade da planta, na safra 2013/2014, foi pelo modelo logarítmico, cujo nível de significância $p=0,106$.

A equação foi $Y = 23,608\ln(\text{NDVI}) + 88,041$ com $R^2 = 0,155$ e $R = 0,394$ (Tabela 12 e Gráfico 15).

Tabela 12. Resultado da análise de regressão aos 10 meses de idade para a safra de 2013/2014.

Modelo Geral			
Modelo	Nível de significância (p)	Coefficiente de determinação (R^2)	Coefficiente de correlação (R)
Linear	0,110	0,152	0,390
Logarítmico	0,106	0,155	0,394
Quadrático	0,254	0,167	0,409
Potência	0,112	0,150	0,387
Exponencial	0,116	0,148	0,385

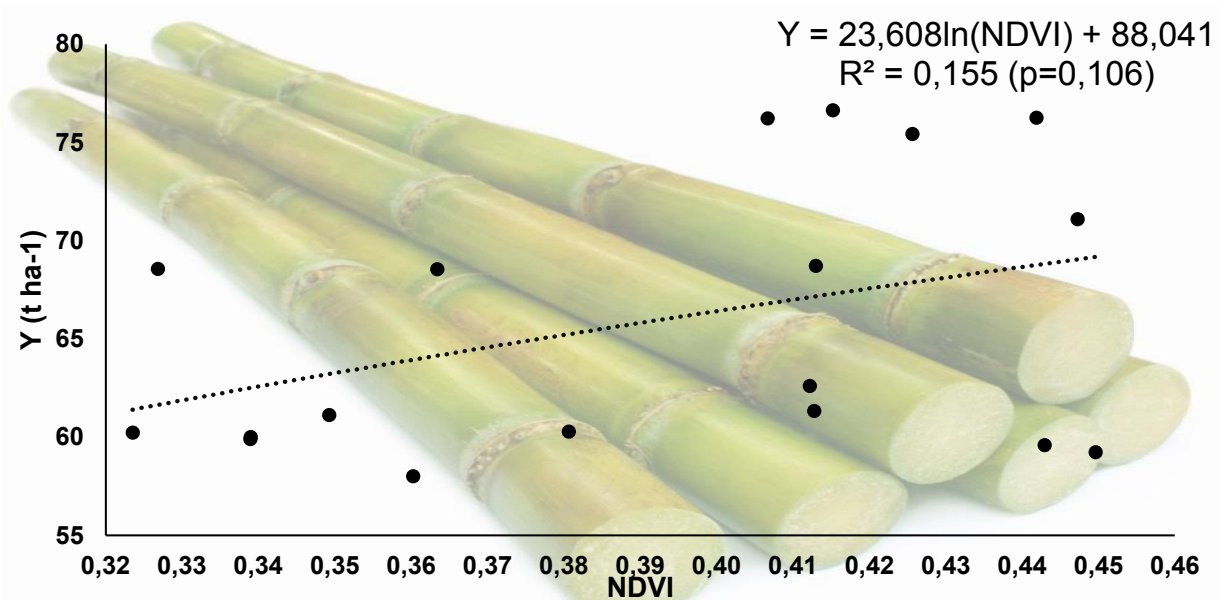


Gráfico 15. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para a safra 2013/2014.

Aos 10 meses, a variedade SP91-1285 que apresentou melhor significância estatística de resposta obtida pela Produtividade de biomassa em função dos índices de vegetação (NDVI), na safra 2013/2014, foi pelo modelo linear, cujo nível de significância $p=0,245$.

A equação é dada por $Y = 23,034NDVI + 52,116$, com $R^2 = 0,317$ e $R = 0,563$, conforme Gráfico 16.

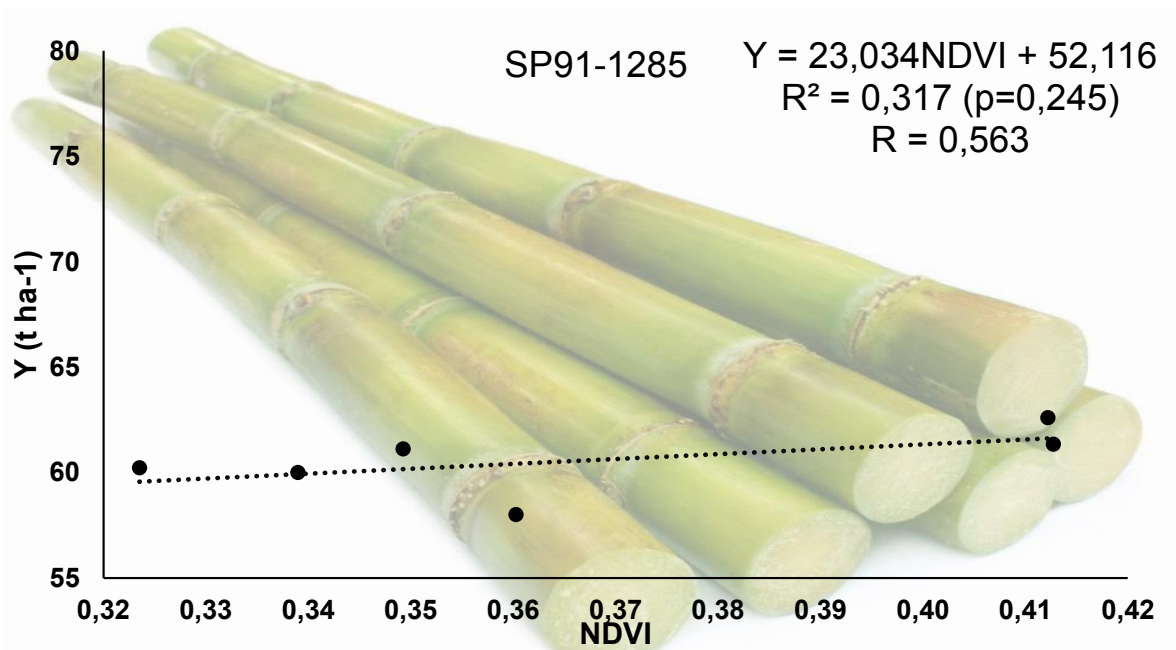


Gráfico 16. Produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI aos 10 meses de idade para variedade SP91-1285 para a safra 2013/2014.

Na área comercial sucroenergética o NDVI variou de 0,08 a 0,67 e Produtividade (Y) entre 54,03 e 72,08 t ha⁻¹, conforme mostra Figura 14, na conversão de NDVI em produtividade pelo modelo exponencial.

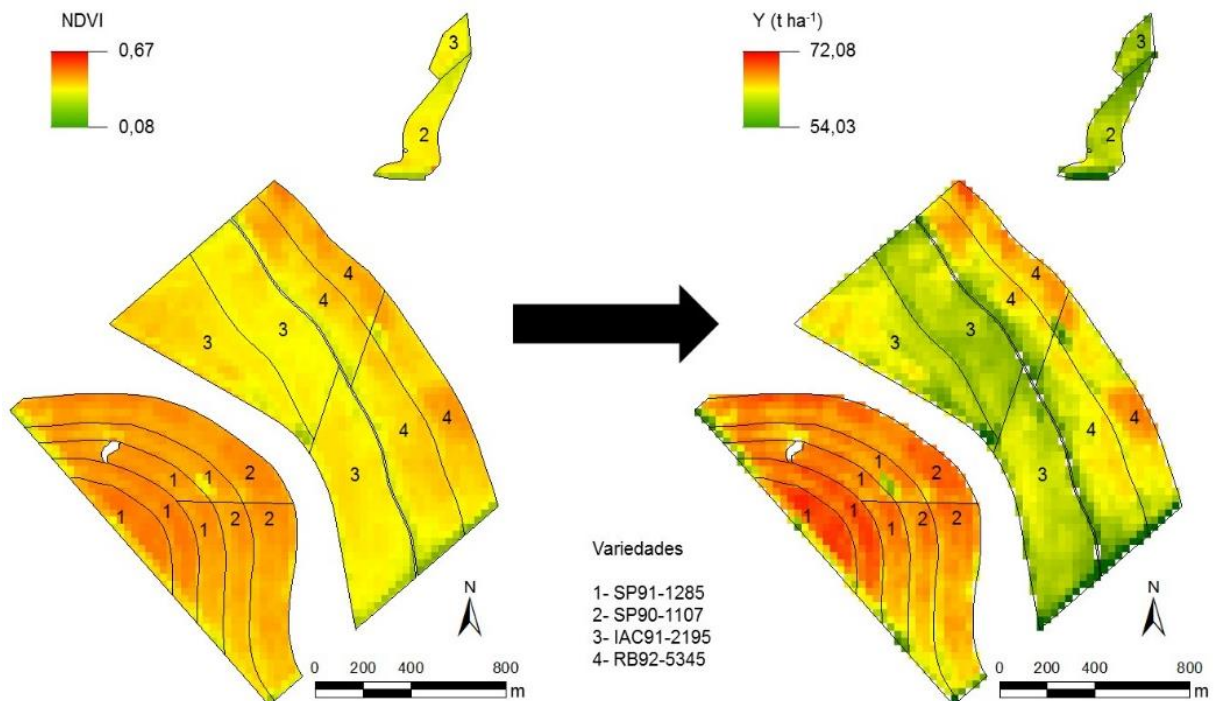


Figura 14: Transformação de imagem NDVI aos 10 meses de idade da planta em Produtividade de biomassa (Y) de cana para a safra 2013/2014.

Analisando, dentre os modelos obtidos para o ano agrícola 2012/2013, o que apresentou melhor qualidade na modelagem para estimar a biomassa foi a partir de imagens dos índices de vegetação (NDVI) atingida com a cana-de-açúcar aos 8 meses de idade após a colheita, o que pode ser explicado pelo maior nível estatístico de significância e maior coeficiente de determinação e correlação.

Já para o ano agrícola 2013/2014 a melhor qualidade estatística, obtida por modelagem para estimar a produtividade em função do NDVI foi aos 8 meses de idade, seguida por 9 e 7 meses com melhor nível de significância, coeficiente de determinação e correlação, respectivamente, contudo aos 10 meses o modelo apresentou menor qualidade estatística.

As variações observadas em relação aos períodos de obtenção dos melhores resultados de modelos podem estar relacionadas a vários aspectos ambientais, como a deficiência hídrica (Abreu et al., 2013), evolução distinta do índice de área foliar em variedades diferentes (Almeida et al., 2008) e ambiente de produção (Maule et al., 2001). Esses fatores podem provocar variabilidade no desenvolvimento vegetativo e no índice de área foliar, provocando maior erro na estimativa pelo NDVI médio do talhão.

Um dos motivos para obtenção de modelos matemáticos de melhor qualidade estatística neste trabalho pode estar correlacionado com a resolução espacial da imagem do Landsat 8 (30 metros), quando confrontados com outras literaturas. Quanto melhor a resolução espacial (tamanho do pixel), mais detalhes podem ser extraídos dos alvos. (NOVO, 2008; JENSEN, 2009)

Vanzela et al. (2015), avaliando a estimativa da produtividade de biomassa (Y) em função das imagens NDVI obtiveram ótima qualidade para a variedade SP-81-3250, com imagens NDVI realizadas aos 10 meses de idade após o corte ($Y = 168,69 \text{ NDVI} + 9,2443$; $r^2 = 0,9377$; $p < 0,01$). Para a variedade RB867515, o melhor período para a estimativa foi aos 7 meses de idade após o corte, porém com baixa significância estatística ($Y = 63,983 \text{ NDVI} + 27,441$; $r^2 = 0,2152$; $p = 0,1286$). Na variedade RB925211, o melhor modelo obtido foi aos 8 meses de idade após o corte, mas também com baixa significância estatística ($Y = 32,34 \text{ NDVI} + 53,201$; $r^2 = 0,0246$; $p = 0,7664$), resultados estes que se assemelham a este trabalho.

Machado (2003), utilizando diferentes bandas e índices de vegetação por meio do sensor ETM (resolução espacial de 30 m do Landsat 7) na estimativa de biomassa de cana-de-açúcar, obteve melhor qualidade da estimativa por meio de modelos lineares, com coeficientes de determinação variando de 0,1182 a 0,5266. Entretanto, os melhores resultados foram obtidos com o GVI (*Greenness Vegetation Index*). Já o NDVI proporcionou modelo com coeficiente de determinação igual a 0,4709, ou seja, semelhantes a este trabalho.

De acordo com Del Grossi et al., (2014), a melhor resposta da produtividade em função do NDVI foi obtida aos 7 meses após o corte da cana ($p = 0,06$ e $r^2 = 0,75$). A pior estimativa de produtividade com imagem NDVI foi aos 9 meses após a

colheita ($p=0,58$ e $r^2=0,18$). Portanto, utilizando imagem NDVI a partir do sensor LISS III do satélite IRS-P6, com 23 metros de resolução espacial ou geométrica.

Picoli et al. (2009), também estimaram a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI, onde utilizaram imagens do sensor MODIS de 250 m de resolução espacial, os mesmos autores obtiveram modelos cujos coeficientes de determinação variaram de 0,25 a 0,31.

Mulianga et al. (2013), ao analisar a produtividade em função dos índices de vegetação mostra que o NDVI anual não está fortemente relacionado com a produtividade de colmos ($p=0,1$). No entanto, quando o NDVI ajustado (WNDVI) é usado, a relação é altamente significativa para o VNDVI aos 11 meses ($p=0,001$) e significativo para VNDVI aos 15 meses ($p=0,01$) com o $R^2 = 0,01; 0,12$ e $0,13$ respectivamente, através de ambas as relações lineares e exponenciais. No entanto, a força dessas correlações é fraca, o que justifica uma análise mais aprofundada por este estudo de outros fatores que afetam o rendimento. Quando o conjunto de dados inteiro está agregados ao longo de todo o período (2002-2010), no nível temporal (análise espacial), a correlação entre a produtividade e VNDVI é significativo com $R^2 = 0,53$, $P < 0,001$; enquanto que quando o conjunto de dados inteiro é agregada ao longo dos seis anos, ao nível do ano (análise temporal); não existe uma correlação significativa entre a produtividade e VNDVI, já o presente trabalho apresentou correlações moderadas e altas, conforme figura apresentada nos resultados.

Segundo Brandão et al. (2009), verificou a diferença entre as classes de cana Soca 1 e Soca X, obteve resultado desta primeira análise onde observou-se que a classe Soca 1 apresentou valor médio de NDVI mais alto (0,33) do que a Soca X (0,26). Nesta época estas duas classes encontravam-se aproximadamente com 4 meses no campo, mostrando que a Soca 1 possui um maior vigor vegetativo, nesta fase inicial de desenvolvimento. A mesma autora avaliou a cana Soca X e a Soca 1 (mesma fase fenológica) ao longo de 9 datas e apresentou valores médios de NDVI mais altos para a Soca 1 do que a Soca X comprovando que áreas advindas de reforma apresentam um maior vigor vegetativo do que áreas que estão há muito tempo no campo, no presente trabalho os índices de vegetação foram superiores variando de -0,49 a 0,82 caracterizando maior vigor vegetativo.

Com o uso da modelagem para estimativa da produtividade agrícola em talhões de cana verifica-se um resultado promissor, principalmente devido à incorporação da variável espectral (índice de vegetação NDVI) no modelo, extraída das imagens do sensor OLI_TIRS, para cada talhão, todavia os resultados poderiam ter sido mais precisos com a compatibilização da resolução espacial das medidas da produção em campo com a da imagem de satélite. O sensor do Landsat 8 possui resolução espacial de 30 m (que corresponde à área medida de 900 m²), e a medida da colheita é totalizada em metros lineares para as áreas dos dentro talhões. Com isso, para a obtenção dos modelos torna-se necessário trabalhar com a média dos valores de NDVI dos pixels dentro de cada talhão, reduzindo a precisão nas medidas da variabilidade espacial dos índices de área foliar e, conseqüentemente, na medida da produtividade.

Recomenda-se que outras análises sejam realizadas a fim de fornecer um futuro mapeamento das áreas aptas a entrarem em reforma em virtude do baixo potencial do talhão (baixos valores de NDVI) com analisar o desempenho dos modelos aplicando a outras áreas, pois estes mapas serão úteis para tomada de decisões para um manejo adequado da cultura.

Com o advento do sensoriamento remoto aplicando os índices de vegetação, é possível sistematizar a resolução espacial das medidas de produção em campo com as das imagens obtidas pelos sensores orbitais utilizados para essa finalidade, o que possibilitará melhorias no processo de estimativa da produtividade. (TRIMBLE, 2012)

O sensoriamento remoto mostrou-se uma ferramenta eficaz para avaliar a produtividade de biomassa temporo-espacialmente por meio dos índices de vegetação por diferença normalizada, possibilitando a visualização das áreas de baixo potencial produtivo e baixa área de cobertura foliar (biomassa) indicando a necessidade da adoção de manejo localizado para elevar a produtividade por talhão.

5. CONCLUSÃO

O modelo matemático que melhor estima a produtividade de biomassa de cana-de-açúcar em função do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), que apresenta melhor significância estatística foi aos 8 meses de idade após a colheita ($Y = 3823,3e^{-5,646NDVI}$; $R^2=0,466$; $p=0,002$) para a safra de 2012/2013.

A estimativa da produtividade de biomassa (Y) em função das imagens NDVI que apresentou melhor qualidade estatística, com imagens NDVI realizadas aos 8 meses ($Y = 31,986e^{1,2071NDVI}$; $R^2 = 0,213$; $p=0,054$), 9 meses ($Y = 66,723NDVI + 31,399$; $R^2 = 0,201$; $p=0,062$) e aos 7 meses de idade após o corte ($Y = 101,5NDVI^{0,9536}$; $R^2 = 0,170$; $p=0,089$) respectivamente, para safra de 2013/2014.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, M. L. de; SILVA, M. de A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A. de; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, v.72, p.263-270, 2013.

ALMEIDA, A. C. DOS S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.

ALENCAR, K. de. **Análise do balanço entre demanda por etanol e oferta de cana-de-açúcar no Brasil**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2012.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1993.

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1989; CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 12., 1989, Vancouver. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1989. v. 1, p. 1355-1358. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=576128>>. Acesso em: 23 jun. 2015.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and Limits of vegetation Indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, n. 2-3, p. 161-173, 1991.

BRANDÃO, D.; GOLTZ, E.; CARVALHO, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; PONZONI, F. J. Distinção de classes de cana-de-açúcar através do NDVI. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, p.105-111, 2009.

CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 1993. p. 31-64.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CASTRO, P. R. C.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Fisiologia da cana-de-açúcar. In: MENDONÇA, A. F. **Cigarrinhas da cana-de-açúcar**: controle biológico. Maceió: Insecta, 2005. p. 3-48.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. **Manual de fisiologia vegetal**: fisiologia de cultivos. Piracicaba: Ceres, 2008. 864 p.

CLEVERS, J. G. W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 29, n. 1, p. 25-37, 1989.

CONAB (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO). **Acompanhamento da safra brasileira**: cana-de-açúcar. Brasília, DF, 2014. v. 2 – safra 2015/16, n. 1- primeiro levantamento, 33p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_09_39_02_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_15-16.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2015.

CRIST, E. P.; CICONE, R. C. Application of the tasseled cap concept to simulated thematic mapper data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 50, p. 343-352, 1984.

DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; GRACIANO, P. A. Efeito da densidade de plantio em duas variedades de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL - STAB, 7., 1999, Londrina. **Anais...** Londrina: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1999. p. 137-140.

DEMATTE, J. L. I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, p. 48-59, 2004.

DEL GROSSI, R. H.; VANZELA, L. S., MUNIN, E. Estimativa da produtividade de biomassa de cana-de-açúcar por meio de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). **Encontro de Pós-Graduação e Iniciação Científica** – Universidade Camilo Castelo Branco, p.317-318, 2014.

DILLEWIJN, C. V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botânica; New York: Stechert-Hafner, 1952. 371 p.

EMBRAPA (EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE). Banco de dados climáticos do Brasil. **Brasília, DF, 2007. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em: 10 jun. 2015.**

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesq. Agropec. Bras.** 26(10): 1615-1624, 1991.

ESRI (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE). **ArcGIS 10**. Redlands, 2008.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azucar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FU, X.; CHUANJIANG, T.; XUXIAO, Z.; JINGYING, F.; DONG, J. An improved indicator of simulated grassland production based on MODIS NDVI and GPP data: a case study in the Sichuan province, China. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 40, p. 102-108, 2014.

GATES, D. M.; KEEGAN, J. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, Washington, DC, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GAUSMANN, H. W.; ALLEN, W. A.; CARDENAS, R. Reflectance of cotton leaves and their structure. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 1, n. 1, p. 110-122, 1969.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 58, n. 3, p. 289-298, dec. 1996.

HAN, S.; HUMMEL, J. W.; GOERING, C. E.; CAHN, M. D. Cell size selection for site specific crop management. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 1, p. 19-26, jan./feb. 1994.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Trad. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 598 p.

JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, Washington, DC, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992.

LANDELL, M. G. de A.; ALVAREZ, R. Cana-de-açúcar. In: FURLANE, A. M. C.; VIÉGAS, G. P. **O melhoramento de plantas no instituto agrônomo**. Campinas: Instituto agrônomo, 1993. p. 77-93.

MACHADO, H.M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 - ETM+**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2003.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação de cana-de-açúcar**. São Paulo, 1984. (Boletim Ultrafertil).

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

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão**: o gerenciamento da variabilidade. Piracicaba, 2001. 83 p.

MORAES, R. A.; ROCHA, J. V.; ROLIM, G.; LAMPARELLI, R. A. C.; MARTINS, M. Avaliação dos dados decendiais de precipitação e temperatura máxima e mínima do ar simulados pelo modelo ECMWF para o Estado de São Paulo. **Irriga**, Botucatu, v. 3, n. 17, p. 397-407, 2012.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa/MG: UFV, 2007. 320 p.

MULIANGA, B.; AGNÈS BÉGUÉ, A.; SIMOES, M.; TODOROFF, P. Forecasting Regional Sugarcane Yield Based on Time Integral and Spatial Aggregation of MODIS NDVI. **Remote Sensing**, doi:10.3390/rs5052184, p.2184-2199, 2013. 99789826

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto: **Princípios e Aplicações**. 3. ed., São Paulo, Blucher, 2008. 363p.

NRSA (NATIONAL REMOTE SENSING AGENCY). **Resourcesat-1 (IRS-P6)**: data user's handbook. Hyderabad, oct. 2013. Disponível em: <http://www.euromap.de/download/P6_data_user_handbook.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2015.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo, EMBRAPA Solos, 1999. 64 p.

PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie. Pawnee National Grasslands, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., 1972, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor: ERIM, 1972. v. 2, p. 1355-1379.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. *Bragantia*, Campinas, v.68, n.3, p.789-795, 2009

PRADO, A. P. A. **Perfilhamento e produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em função da densidade de plantio**. 1988. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PRADO, H.; PÁDUA JÚNIOR, A. L. Ambientes de produção. In: RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2006. p. 157-172.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R. Odified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994.

RICHARDSON, A. J.; WEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 43, n. 12, p. 1541-1552, 1977.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100 p. Apostila.

ROLIM, G. de S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. de. Classificação climática de Koppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington DC: NASA, Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309-317. NASA SP-351.

RUDORFF, B. F. T. **Dados LANDSAT uma estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 1985. 114 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.

SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livroceres, 2006. 415 p.

SILVA, M. A.; LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; XAVIER, M. A. Produtividade de mudas sob diferentes densidades de plantio, em viveiro oriundo de cultura de meristema. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL - STAB, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1999. p. 538-543.

SPSS Inc. **SPSS statistics for Windows**. Version 17.0. Chicago, 2008.

SUGUITANI, C.; MATSUOKA, S. Efeitos do fósforo nas características industriais e na produtividade agrícola em cana-de-açúcar (cana-planta) cultivada em duas regiões do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Resumos...** Londrina: SBCS, 2001. p. 119.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 690 p.

TRIMBLE Navigation Limited. **CFX-750 Display with the Yield Monitoring System**. Westminster: TRIMBLE, 2012. 8p.

TUCKER, C.G. A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. **Photogramm. Eng. Remote Sens.** 44: 1316-1380, 1977.

UNICA (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR). **Relatório final da safra 2011/2012**: Região Centro-Sul. São Paulo, 2012. 28 p.

USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). Landsat 8. Reston, 2015.

VANZELA, L. S., BRAZ, A. R. C., ARAÚJO, C. A. G., OLIVEIRA, G. S., COSTA, B. O. Sensoriamento remoto para estimar a produtividade de Biomassa de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, São Pedro. **Resumos...** São Paulo: CONBEA, 2015.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 2, p. 244-255, 2004.

WILLMOTT, C. J.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; JOHANNES, J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, C. M.; ACKLESON, S. G.; O'DONNELL, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WOOLLEY, J. T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 47, n. 5, p. 656-662, 1971.

ZULLO, J. R. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994.189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.