

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

EVERTON DA SILVA NEIRO

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA DISCRIMINAÇÃO DE  
VARIEDADES E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE  
AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Maringá

2013

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)**

N415g      Neiro, Everton da Silva  
Geotecnologias aplicadas na discriminação de variedades e estimativa da produtividade agroindustrial da cana-de-açúcar / Everton da Silva Neiro. -- Maringá, 2013.

ii-xiv, 146 f. : il. col., figs., tabs.  
Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2013.

1. Geotecnologia - Espectrorradiometria. 2. Plantas - Cana-de-açúcar - Bom Sucesso - Paraná. 3. Sensoriamento remoto da vegetação - Sensor MODIS. 4. Colorimetria. I. Nanni, Marcos Rafael, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDD 21.ed. 633.61

MN-0001101

EVERTON DA SILVA NEIRO

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA DISCRIMINAÇÃO DE  
VARIEDADES E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE  
AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni

Maringá

2013

# FOLHA DE APROVAÇÃO

EVERTON DA SILVA NEIRO

## **GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA DISCRIMINAÇÃO DE VARIEDADES E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Agronomia pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

### COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni  
Universidade Estadual de Maringá (Presidente)

Profª. Dra. Aline Marques Genu  
Universidade Estadual do Centro Oeste

Prof. Dr. Edvard Elias de Souza Filho  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. José de Deus Viana da Mata  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Antonio Saraiva Muniz  
Universidade Estadual de Maringá

Aprovada em: 02 de Agosto de 2013.

Local de defesa: Anfiteatro 1, Bloco J-45, *campus* da Universidade Estadual de Maringá.

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu filho, Eduardo, minha filha, Emanuela,  
minha esposa Eneida,  
meus amores,  
minhas alegrias e  
minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS por iluminar as minhas idéias e estar sempre presente em minha vida.

Ao Professor Dr. Marcos Rafael Nanni, pela oportunidade de realizar o curso, inspiração, orientação desde o planejamento à dissertação deste trabalho, confiança, incentivo e ensinamentos profissionais e de vida.

O meu mais alto apreço ao Professor Dr. José de Deus Viana da Mata, pela amizade e ensinamentos, assim como pelo exemplo de educação e bondade no trato com as pessoas.

Gostaria de deixar um agradecimento especial a amiga Franciele Romagnoli e aos amigos Anderson Antonio da Silva Gualberto e Cassio Donizeti de Oliveira pela grande colaboração para conclusão deste trabalho.

Enfim, um trabalho dessa natureza é constituído com a participação de muitas pessoas. É resultado de um esforço coletivo. Recebi inúmeras contribuições através de incentivo, apoio, financiamento, sugestões, informações, orientações e trabalho direto. No entanto, nada foi mais importante do que o carinho e a solidariedade que recebi, vindos desde os mais humildes até os mais ilustres.

Por isso, nesse momento, gostaria de agradecer essa generosidade, que não se mede, não tem preço, mas que é a alma desse trabalho. Como forma de retribuí-los, ainda que de maneira simbólica, fiz uma tentativa de deixar registrado aqui o nome de todos os que me presentearam com aquela força a mais. Tomei a liberdade de citar-lhes apenas o primeiro nome, pois é dessa forma que os amigos são tratados. A Camila, Vânia, Thomas, Rafael, Everson e Carlos, muito obrigado.

Gostaria ainda de agradecer à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul por conceder a permissão para realização deste curso, a Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de realização deste curso e suporte desta pesquisa, Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) pela concessão de bolsa de Doutorado (Chamada FUNDECT nº 17/2009 POSGRAD - Doutorado) e a usina Cooperval pelo apoio logístico e técnico.

## EPÍGRAFE

[...] talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito [...] Não somos o que deveríamos ser, mas somos o que iremos ser. Mas graças a Deus, não somos o que éramos.

Martim Luther King

## LISTA DE TABELAS

### Revisão Geral

|                                                            | Pág. |
|------------------------------------------------------------|------|
| Tabela 1. Características gerais do instrumento MODIS..... | 15   |

### Capítulo 1

|                                                                                                                                                                                                          | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabela 1. Relação dos comprimentos de onda utilizadas para análise discriminante das variedades de cana-de-açúcar, safras 2011/12 e 2012/13, selecionadas pelo procedimento STEPDISC do sistema SAS..... | 39   |
| Tabela 2. Equações discriminantes para as variedades de cana-de-açúcar estudadas na safra 2011/12.....                                                                                                   | 40   |
| Tabela 3. Equações discriminantes para as variedades de cana-de-açúcar estudadas na safra 2011/12.....                                                                                                   | 44   |
| Tabela 4. Número de observações e porcentagem de classificação das variedades dentro de cada classe utilizando-se as 116 e 118 comprimentos de onda para todas as variedades da área de estudo.....      | 51   |

### Capítulo 2

|                                                                                                                                                                                         | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabela 1. Estatística descritiva dos parâmetros de cor para as safras 2011/12 e 2012/13.....                                                                                            | 70   |
| Tabela 2. Valores médios de luminosidade ( $L^*$ ), de intensidade (-) $a^*$ (componente vermelho-verde) e de intensidade $b^*$ (componente amarelo-azul) para o ano safra 2011/12..... | 73   |
| Tabela 3. Valores médios de croma (C), ângulo de matiz ( $h^\circ$ ) para o ano safra 2011/12.....                                                                                      | 74   |
| Tabela 4. Valores médios de luminosidade ( $L^*$ ), de intensidade (-) $a^*$ (componente vermelho-verde) e de intensidade $b^*$                                                         | 76   |

|           |                                                                                                                                                                                            |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|           | (componente amarelo-azul) para o ano safra 2012/13.....                                                                                                                                    |    |
| Tabela 5. | Valores médios de croma (C), ângulo de matiz (h°) para o ano safra 2012/13.....                                                                                                            | 78 |
| Tabela 6. | Valores médios de TCH (tonelada de cana por hectare) para os anos safra 2011/12 e 2012/13.....                                                                                             | 79 |
| Tabela 7. | Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2011/12..... | 80 |
| Tabela 8. | Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2012/13..... | 82 |

### Capítulo 3

|           |                                                                                                                                                                                            |      |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|           |                                                                                                                                                                                            | Pág. |
| Tabela 1. | Estatística descritiva dos índices de vegetação para as safras 2011/12 e 2012/13.....                                                                                                      | 100  |
| Tabela 2. | Valores médios dos índices de vegetação RATIO, RVI, NDVI, GNDVI e EVI da cana-de-açúcar nas quatro épocas para os anos safras 2011/12 e 2012/13.....                                       | 103  |
| Tabela 3. | Valores médios de tonelada de cana por hectare (TCH) para o ano safra 2011/12 e 2012/13.....                                                                                               | 109  |
| Tabela 4. | Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2011/12..... | 110  |
| Tabela 5. | Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2012/13..... | 112  |

## Capítulo 4

|                                                                                                                                                                                                                        | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabela 1. Datas de amostragem em campo nas microrregiões e datas das imagens MODIS.....                                                                                                                                | 132  |
| Tabela 2. Tabela 2. Valores de NDVI e EVI, obtidos com os sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA, para a safra 2011/12.....                                                                                                | 134  |
| Tabela 3. Valores de NDVI e EVI, obtidos com os sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA, para a safra 2012/13.....                                                                                                          | 135  |
| Tabela 4. Produtividade (TCH) da cana-de-açúcar nas safras 2011/12 e 2012/13.....                                                                                                                                      | 137  |
| Tabela 5. Correlação de Pearson entre índices de vegetação NDVI e EVI (obtidos com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 e nas imagens MODIS) e produtividade da cana-de-açúcar (TCH) e p-valor, para a safra 2011/12..... | 138  |
| Tabela 6. Correlação de Pearson entre índices de vegetação NDVI e EVI (obtidos com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 e nas imagens MODIS) e produtividade da cana-de-açúcar (TCH) e p-valor, para a safra 2011/12..... | 139  |

## LISTA DE FIGURAS

### Revisão Geral

|                                                                                                                                                   | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Características ópticas (absorbância, refletância e transmitância) de uma folha verde como função do comprimento de onda detectado..... | 11   |
| Figura 2. Interação conceitual entre folha da cultura e luz.....                                                                                  | 12   |
| Figura 3. (a) Diagrama de cromaticidade. (b) O espaço CIELab.....                                                                                 | 14   |

### Capítulo 1

|                                                                                                             | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Mapa de localização da área do estudo (a) e o detalhamento da divisão interna em talhões (b)..... | 32   |
| Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper.....                           | 33   |
| Figura 3. FieldSpec 3 JR em ambiente de trabalho.....                                                       | 34   |
| Figura 4. Geometria utilizada na aquisição dos dados de laboratório.....                                    | 35   |
| Figura 5. Média dos espectros de folha verde de cana-de-açúcar na safra 2011/12.....                        | 37   |
| Figura 6. Média dos espectros de folha verde de cana-de-açúcar na safra 2012/13.....                        | 37   |

### Capítulo 2

|                                                                                                    | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Área experimental na Fazenda Santa Lúcia.....                                            | 64   |
| Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper.....                  | 65   |
| Figura 3. Área experimental ( a ); Parcelas ( b ); Pesagem dos colmos da cana-de-açúcar ( c )..... | 66   |
| Figura 4. Espaço de cor CIELab.....                                                                | 67   |

### Capítulo 3

|                                                                                              | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Área experimental na Fazenda Santa Lúcia.....                                      | 93   |
| Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper.....            | 95   |
| Figura 3. Área experimental (a); Parcelas (b); Pesagem dos colmos da cana-de-açúcar (c)..... | 95   |
| Figura 4. FieldSpec 3 JR em ambiente de trabalho.....                                        | 96   |
| Figura 5. Geometria utilizada na aquisição dos dados de laboratório.....                     | 97   |

### Capítulo 4

|                                                                                                             | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Mapa de localização da área do estudo (a) e o detalhamento da divisão interna em talhões (b)..... | 126  |
| Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper.....                           | 127  |
| Figura 3. FieldSpec 3 JR em ambiente de trabalho.....                                                       | 128  |
| Figura 4. Geometria utilizada na aquisição dos dados de laboratório.....                                    | 129  |
| Figura 5. <i>Tiles</i> que recobrem o Brasil.....                                                           | 131  |
| Figura 6. Seleção dos <i>pixels</i> em uma microrregião, Fazenda Marumbi, e suas coordenadas.....           | 132  |

## SUMÁRIO

|        |                                                                                                                                                                  |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO GERAL.....                                                                                                                                            | 03 |
| 2.     | REVISÃO DE LITERATURA GERAL.....                                                                                                                                 | 05 |
| 2.1.   | Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar.....                                                                                                                | 05 |
| 2.2.   | Uso de Geotecnologias.....                                                                                                                                       | 09 |
| 2.3.   | Sensoriamento Remoto.....                                                                                                                                        | 10 |
| 2.4.   | Comportamento espectral.....                                                                                                                                     | 11 |
| 2.5.   | A cor.....                                                                                                                                                       | 13 |
| 2.6.   | O sensor MODIS.....                                                                                                                                              | 14 |
| 2.7.   | Análise Discriminante.....                                                                                                                                       | 16 |
| 3.     | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                 | 19 |
| 4.     | CAPÍTULO 1: Análise discriminante de variedades de cana-de-açúcar<br>por meio da resposta espectral no nível terrestre.....                                      | 26 |
| 4.1.   | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                                  | 29 |
| 4.2.   | MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                                          | 32 |
| 4.2.1. | Caracterização da área experimental.....                                                                                                                         | 32 |
| 4.2.2. | Amostragem.....                                                                                                                                                  | 33 |
| 4.2.3. | Obtenção dos dados radiométricos em laboratório<br>(Espectrorradiometria).....                                                                                   | 34 |
| 4.2.4. | Análise estatística e algoritmo utilizado.....                                                                                                                   | 35 |
| 4.5.   | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                                      | 37 |
| 4.6.   | CONCLUSÃO.....                                                                                                                                                   | 54 |
| 4.7.   | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                 | 55 |
| 5.     | CAPÍTULO 2: Colorimetria digital para discriminação de variedades<br>de cana-de-açúcar em épocas distintas de colheita e sua relação com a<br>produtividade..... | 58 |
| 5.1.   | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                                  | 61 |
| 5.2.   | MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                                          | 64 |
| 5.2.1. | Caracterização da área experimental.....                                                                                                                         | 64 |
| 5.2.2. | Amostragem.....                                                                                                                                                  | 65 |
| 5.2.3. | Produtividade da cana-de-açúcar.....                                                                                                                             | 66 |
| 5.2.4. | Colorimetria.....                                                                                                                                                | 66 |

|        |                                                                                                                                                                                                |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.5. | Análises estatísticas.....                                                                                                                                                                     | 67  |
| 5.3.   | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                                                                    | 69  |
| 5.4.   | CONCLUSÕES.....                                                                                                                                                                                | 84  |
| 5.5.   | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                                               | 85  |
| 6.     | CAPÍTULO 3: Relação entre índices espectrais de vegetação com a<br>produtividade e discriminação de variedades de cana-de-açúcar.....                                                          | 88  |
| 6.1.   | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                                                                | 91  |
| 6.2.   | MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                                                                        | 93  |
| 6.2.1. | Caracterização da área experimental.....                                                                                                                                                       | 93  |
| 6.2.2. | Amostragem.....                                                                                                                                                                                | 94  |
| 6.2.3. | Produtividade da cana-de-açúcar.....                                                                                                                                                           | 95  |
| 6.2.4. | Obtenção dos dados radiométricos em laboratório<br>(Espectrorradiometria).....                                                                                                                 | 96  |
| 6.2.5. | Índices de Vegetação.....                                                                                                                                                                      | 97  |
| 6.2.6. | Análises estatísticas.....                                                                                                                                                                     | 98  |
| 6.3.   | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                                                                    | 100 |
| 6.4.   | CONCLUSÕES.....                                                                                                                                                                                | 115 |
| 6.5.   | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                                               | 116 |
| 7.     | CAPÍTULO 4: Índices de vegetação originados dos sensores orbital e<br>terrestre aplicados na discriminação de variedades e correlação com a<br>produtividade na cultura da cana-de-açúcar..... | 120 |
| 7.1.   | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                                                                | 123 |
| 7.2.   | MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                                                                        | 126 |
| 7.2.1. | Amostragem.....                                                                                                                                                                                | 127 |
| 7.2.2. | Obtenção dos dados radiométricos em laboratório<br>(Espectrorradiometria).....                                                                                                                 | 127 |
| 7.2.3. | Índices de Vegetação.....                                                                                                                                                                      | 129 |
| 7.2.4. | Séries temporais de índices de vegetação (Composições) MODIS.....                                                                                                                              | 130 |
| 7.2.5. | Produtividade da cana-de-açúcar.....                                                                                                                                                           | 132 |
| 7.2.6. | Análises estatísticas.....                                                                                                                                                                     | 133 |
| 7.3.   | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                                                                                    | 134 |
| 7.4.   | CONCLUSÕES.....                                                                                                                                                                                | 142 |
| 7.5.   | REFERÊNCIAS.....                                                                                                                                                                               | 143 |

# **GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA DISCRIMINAÇÃO DE VARIEDADES E ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE AGROINDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

## **RESUMO GERAL**

O trabalho desenvolvido teve como foco o uso de Geotecnologias, dentre elas o Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas, que foram utilizadas para estimar a produtividade e discriminar variedades de cana-de-açúcar em área de produção industrial, por meio do desenvolvimento de metodologia baseada na relação existente entre a variabilidade espectral e os parâmetros biofísicos que caracterizam o estado de crescimento dos dosséis estudados e o ambiente. Para tanto, imagens multiespectrais temporais de diferentes talhões e variedades de cana industrial foram adquiridas do sensor MODIS, a bordo da plataforma TERRA. A partir dos dados do produto MOD13Q1 (índices de vegetação - composição de 16 dias, quatro bandas espectrais com 250 m de resolução espacial), sobre cada área monitorada, os valores de NDVI e EVI foram extraídos nos anos-safra 2011/12 e 2012/13. Ao mesmo tempo, os dados biofísicos foram coletados em campo, nessas áreas, durante o crescimento da cultura. Para estabelecimento das curvas espectrais e colorimetria das folhas verdes das plantas, foi utilizado um espectrorradiômetro Fieldspec-3 e um colorímetro Minolta CR-400. Com isso foi possível comparar e analisar a produção real, as diferenças de tonalidade mostradas pelos índices de vegetação e colorimetria, as modificações da biomassa e determinar as correlações do conjunto de dados a fim de obter o máximo de precisão na estimativa da produtividade de cana-de-açúcar. Nos resultados obtidos, observou-se que a partir da curva de reflectância das folhas, por meio do método multivariado de análise discriminante, obteve-se total discriminação das variedades de cana-de-açúcar aqui estudadas com 100% de acerto. Entretanto, observou-se, também, que a reflectância da cana-de-açúcar no espaço de cor, colorimetria, não apresentou diferenças significativas na discriminação das variedades, assim como tão pouco apresentou correlação positiva com a produtividade. Nas safras acompanhadas, os índices de vegetação obtidos pelos sensores FieldSpec 3 e MODIS, não foram observadas correlações significativas entre estes sensores nem, também, com a produtividade.

Palavras-chave: Espectrorradiometria. Sensor MODIS. Colorimetria. Sensoriamento Remoto.

# **GEOTECHNOLOGY APPLIED TO VARIETY DISCRIMINATION AND SUGARCANE AGROINDUSTRIAL PRODUCTIVITY ESTIMATION**

## **ABSTRACT**

This work focused on the use of geotechnology such as Remote Sensing and Geographic Information Systems as to estimate productivity and discriminate sugarcane varieties in industrial production areas through a methodology based on spectrum variability and biophysics parameters that characterize plant growth and the environment. Temporal multispectrum images from different zones and sugarcane varieties were obtained through the use of the sensor MODIS, an orbital sensor. The NDVI and EVI indexes were generated from the MOD13Q1 data (which encompasses the vegetation index – 16 days composition, four band spectrum and 250 m space resolution) for each monitored area and considering two different seasons: 2011/12 e 2012/13. At the same time, biophysics data were collected from these areas during plants growth. A Fieldspec-3 spectroradiometer and a Minolta CR-400 colorimeter were used for generating spectrum curves and colorimetric information of green leaves, respectively. With that information it was possible to compare and analyze the actual production, tone differences indicated by the vegetation indexes and colorimetric information, biomass modification and establish correlation as to accurately estimate sugarcane productivity. Leaf reflectance curves, obtained through the multivariate method of discrimination analysis, led to the sugarcane discrimination with 100% confidence. However, it was also observed that sugarcane reflectance in the color space, known as colorimetry, did not indicate significant differences for variety discrimination, as well as no correlation to productivity was identified either. Finally, no significant correlation was identified for the vegetation indexes obtained from the two sensors (MODIS and FieldSpec 3) or between the indexes and productivity.

Key words: Spectroradiometry. MODIS Sensor. Colorimetry. Remote Sensing.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Desde o início do seu cultivo, já nas primeiras décadas após a chegada dos Portugueses ao Brasil, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) vem exercendo notável influência nos ciclos econômicos e no desenvolvimento do país. O Brasil é o maior produtor mundial, sendo responsável por 35% da produção, seguido da Índia e China (FAOSTAT, 2012). O país obteve uma produção de 560,36 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2011/2012, com queda de 5,6% em relação à safra 2010/11 e estima-se aproximadamente 596,63 milhões de toneladas para a safra 2012/2013, em uma área plantada superior a oito e meio milhões de hectares. Este volume estimado representa um aumento de 6,5% na produção (Conab, 2012).

Ao mesmo tempo, a cultura transformou-se também numa atividade agrícola altamente tecnificada exigindo, constantemente, informações mais precisas e rápidas que possibilitem o gerenciamento integrado do setor agrícola das usinas e destilarias com as necessidades prementes do mercado financeiro. Dentre estas informações, a estimativa do potencial de produção assume um papel essencial para a logística do transporte, processamento e armazenamento da produção, bem como para a tomada de decisões relacionadas à comercialização dos produtos finais (açúcar e álcool) e são fatores importantes para o planejamento estratégico das empresas (Fortes, 2003).

Porém, os métodos tradicionais de coleta de dados referentes à avaliação de produção de cana-de-açúcar, ainda muito utilizados, tais como, levantamentos, amostragens e observações em campo. Esses levantamentos são, geralmente, realizados por técnicos, que retiram as amostras nos períodos que antecedem as colheitas e não consideram a distribuição espacial e nem a variabilidade existente nas grandes áreas plantadas apresentando, por isso, sérias limitações (Fortes e Demattê, 2006).

Com o avanço tecnológico, técnicas de sensoriamento remoto têm-se mostrado úteis no monitoramento de áreas agrícolas com a cultura da cana-de-açúcar. Os estudos que vêm sendo desenvolvidos nesta linha de pesquisa viabilizam a obtenção de informações importantes como extensão e localização de diferentes culturas, contagem de área plantada; estimativa de produtividades, planejamento da produção agrícola. Segundo Pino (2001), as chamadas geotecnologias, que podem ser definidas como um conjunto de técnicas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação com referência geográfica, podem auxiliar na obtenção dessas informações de forma mais rápida, precisa e com menor custo, quando comparadas às geradas pelas técnicas subjetivas tradicionalmente utilizadas.

No âmbito do sensoriamento remoto, o monitoramento do ciclo vegetativo das culturas agrícolas é realizado através de observações das curvas espectrais da vegetação e, principalmente, através da geração e análise dos índices de vegetação (IV). Estes índices são obtidos pela transformação linear entre o valor espectral das diferentes bandas do sensor, minimizando a influência de fatores externos que causam perturbações nas respostas radiométricas dos dosséis estudados (Pellegrino, 2001).

A aplicação dos IVs pode anteceder a produção da cana-de-açúcar ao permitir correlações entre as variações de reflectância durante o ciclo da cultura, os parâmetros biofísicos (IAF, biomassa, cobertura do solo e vigor vegetativo) e a produtividade obtida na área estudada. Evidentemente que a análise das correlações e os modelos matemáticos ao serem ajustados devem representar a relação entre a produtividade e as respostas espectrais de tal maneira que se obtenha o máximo de precisão na estimativa da produção de cana de açúcar. Segundo Rudorff (1985), as imagens adquiridas pouco antes do início da safra (fevereiro/março) fornecem a melhor correlação entre o índice vegetativo e a produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

No entanto, um dos grandes problemas encontrados na obtenção dos modelos matemáticos para avaliação da previsão das culturas deve-se ao fato destes correlacionarem IV x produtividade, não atendo-se a fatores de produção, dentre eles o solo, bem como seu estágio de desenvolvimento.

Como destacado por Simões (2004), ainda existe carência de estudos que relacionam parâmetros agronômicos da cultura da cana com sua resposta espectral, embora existam vários trabalhos que enfocam o comportamento espectral da cana-de-açúcar utilizando-se diferentes sensores.

Nesse contexto se insere o presente estudo, tendo como proposta a utilização de geotecnologias e análises estatísticas com o desenvolvimento de uma metodologia que leve em consideração as relações existentes entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, obtida em seu estágio de máximo crescimento, para discriminar variedades e avaliar a correlação direta da reflectância da cana-de-açúcar com a produtividade da cultura.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL

### 2.1. Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies, porém, as canas atualmente cultivadas, na sua maioria, são híbridas. Os primeiros relatos do cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) provêm da Nova Guiné onde sua existência era tida como planta silvestre, difundindo-se, progressivamente para a China e Índia (Ferreira, 2009). Segundo Guimarães (2008), a maior parte da cana-de-açúcar comercial é produzida entre as latitudes 35° N e 30° S e em altitudes que variam desde o nível do mar até 1.000 m. Chegou ao Brasil na metade do século XVI e atualmente ocupa a terceira posição em área plantada no país, ficando atrás apenas da soja e do milho (IBGE, 2010). Do seu processo industrial, obtém-se o açúcar e suas derivações como o álcool anidro e hidratado, o vinhoto, a levedura de cana, o bagaço, entre outros (Kuva, 2006).

O Brasil é o maior produtor, consumidor e exportador de cana-de-açúcar e atualmente responde por 20% da produção mundial (Paz et al., 2009) e 40% das exportações. O etanol brasileiro produzido a partir da cana-de-açúcar é tido como o mais competitivo no contexto mundial, seja em termos energéticos, ambientais ou econômicos (Vieira Júnior et al., 2008). Principalmente devido ao aumento da demanda por energias renováveis, a produção de etanol no país deve alcançar 41,6 bilhões de litros em 2018, equivalente ao dobro da produção em 2007 (Brasil, 2008).

A agroindústria do açúcar e do álcool gera para o Brasil, em produto final, dez bilhões de dólares por ano, um milhão de empregos diretos e o seqüestro de 20% das emissões de carbono que o setor de combustíveis fósseis emite no país (Felipe, 2008).

De acordo com dados da FAO (2012), historicamente o Brasil é o país com a maior área colhida com a cana-de-açúcar, seguido da Índia, China, Tailândia, México, Paquistão, Colômbia, Austrália, Filipinas. Ernesto (2009) relata que a cana-de-açúcar é cultivada atualmente em mais de 200 países.

O estado de São Paulo é o maior produtor com 51,82%, seguido por Minas Gerais com 8,46%, Goiás com 8,69%, Paraná com 7,13%, Mato Grosso do Sul com 6,50%, Alagoas com 5,26% e Pernambuco com 3,63%. Nos demais estados produtores as áreas são menores, com representações abaixo de 3%. A produtividade média brasileira está estimada em 69.963 kg ha<sup>-1</sup>, 4,3% maior que na safra 2011/12, que foi de 67.060 kg ha<sup>-1</sup> (Conab, 2012).

Atualmente no Brasil, existem alguns programas de melhoramento genético-varietal para a cana que foram responsáveis pela substituição das variedades importadas, entre eles, o

programa da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA) - variedades RB, que assumiram o programa do extinto IAA/Planalsucar; do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC - antiga Copersucar) - variedades SP/CTC; do Instituto Agrônomo de Campinas (variedades IAC) e CanaVialis - variedades CV (Benvenuti, 2005). Nestes programas procura-se obter, além das características agrônômicas de produtividade, rusticidade, resistência a pragas e doenças, algumas características industriais como alto teor de sacarose e teor médio de fibra, condições essenciais para uma exploração em bases técnico-econômicas (Azevêdo et al., 2003).

Sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C4, é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até  $100 \text{ mg dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  fixado pela área foliar (Rodrigues, 1995).

De acordo com Frasson (2007), as características dos cultivares influenciam a eficiência fotossintética da cana, além das variações climáticas que prevalecem durante o desenvolvimento da cultura. A fotossíntese é correlacionada negativamente com a largura das folhas e positivamente com a sua espessura. Posição mais vertical da folha no colmo traduz-se em maior eficiência fotossintética, mormente em populações de alta densidade populacional, devido à penetração mais eficiente da luz no dossel. A fotossíntese varia com a idade das folhas, atingindo valores de fixação de C4 apenas as folhas recém-expandidas, enquanto as folhas mais velhas e as muito jovens realizam fotossíntese em níveis semelhantes à das plantas C3.

Na região Centro-Sul, a safra de cana-de-açúcar tem início no mês de abril e termina em novembro do mesmo ano, dependendo da época de maturação da variedade cultivada. As variedades para finalidades industriais podem ser: precoces, quando no início da safra (abril, no Estado de São Paulo) já apresentam alto teor de açúcar; médias, quando o teor é atingido em meados de julho a agosto, e tardias, quando entram em maturação a partir do mês de setembro (Cesar e Silva, 1993).

Entre fatores de produção da cana-de-açúcar, a variedade ocupa lugar de destaque, já que é o único fator capaz de proporcionar aumentos significativos na produtividade industrial, sem aumentos nos custos de produção (Andrade, 2001).

As características varietais definem a capacidade de brotação de soqueiras, perfilhamento, fechamento de entrelinhas, a altura, o número de colmos por planta, diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas, a arquitetura da parte aérea, resistência a

pragas e doenças, maturação, produtividade, entre outras características (Rodrigues, 1995; PMGCA, 2008).

Existem variedades de ciclo precoce, médio e tardio, de acordo com a duração da fase de maturação de cada variedade (Rodrigues, 1995). Isso permite que a colheita seja realizada durante um longo período, que normalmente varia de maio (precoce) a novembro (tardio).

De acordo com censo varietal realizado pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar - PMGCA (2008), em 119 unidades da região centro sul do Brasil, abrangendo uma área total de 2.340.057 ha, 54% são variedades RB, 42% são variedades SP, 1% é variedade IAC e 3% correspondem a outras variedades.

A seguir seguem as principais características, das seis cultivares alvos deste estudo, descritas por PMGCA (2008).

**RB 72454:** Germinação regular, má brotação das socas por pisoteio em solos argilosos úmidos, médio perfilhamento da cana-planta e da cana-soca, regular velocidade de crescimento, porte médio, hábito de crescimento ereto, bom fechamento das entrelinhas, raro tombamento, alta densidade de colmo, colmos empalhados, folhas novas espetadas podendo apresentar-se dobradas nas pontas e folhas mais velhas curvadas no terço inferior. Ampla adaptabilidade e alta estabilidade; alta produtividade agrícola.

**RB 835054:** Touceiramento médio, com colmos eretos, pouco empalhados, de fácil despalha, de diâmetro médio, e de cor verde clara, com mancha de cera escurecida quando exposta ao sol. Bom comportamento como cana de ano; alta produtividade agrícola e industrial. PUI-longo. Difícil florescimento.

**RB 855453:** Boa brotação de soqueira; bom perfilhamento e fechamento de entrelinhas, hábito de crescimento ereto, raro tombamento, colmos medianamente empalhados, folhas de largura e comprimento médios com curvatura na ponta, média exigência em solos, muito exigente em água.

**RB 855536:** Boa germinação, ótima brotação de soqueira, médio perfilhamento da cana-planta e alto da cana-soca, velocidade de crescimento regular, porte médio, tomba com certa facilidade, hábito de crescimento ereto e aberto, colmos semi-empalhados, folhas de largura e comprimento médios arqueadas.

**RB 855156:** Elevado touceiramento, principalmente na soca, colmos eretos, mas decumbentes na fase adulta, empalhados, de diâmetro fino a médio, de cor verde-clara, e com presença de rachaduras. Ótima capacidade de brotação de soqueiras. Alta precocidade.

**RB 966928:** Precoce à média, com colheita em abril-maio. Possui alta produtividade e capacidade de perfilhamento. Recomenda-se plantar em ambientes de médio a alto potencial e colher no início a meio de safra. É variedade tolerante ao carvão, ferrugem marrom, escaldadura e mosaico.

Na cultura da cana-de-açúcar, um ambiente para cultivo de uma variedade pode ser considerado como sendo o conjunto de diversos fatores (ano de plantio, local, mês de plantio, mês de corte, etc.) que influenciam na sua produtividade agrícola e industrial (Felipe, 2008).

O desenvolvimento e a produtividade da cana-de-açúcar são limitados por fatores bióticos e abióticos, que incluem a variedade (Landell et al., 2005), o manejo fitotécnico, como o espaçamento (Galvani et al., 1997), controle de plantas infestantes (Kuva et al., 2003), pragas (Dinardo-Miranda et al., 2008) e doenças (Ferro et al., 2007), correção e adubação do solo (Saldanha et al., 2007), nutrição mineral da cultura (Rossetto e Dias, 2005) e, sobretudo, a interação entre estes fatores. As perspectivas mais promissoras de novos aumentos de produtividade estão baseadas na adequação das variedades de cana-de-açúcar ao zoneamento climático e, principalmente, as diferentes classes de solos (Oliveira, 2012).

A época de plantio depende das condições locais, pois a brotação dos toletes exige calor e umidade suficientes. Felipe (2008) cita que a data de plantio exerce influência significativa na produtividade da cana-de-açúcar. No estado de São Paulo o plantio da cultura ocorre num amplo período do ano. Normalmente, são recomendadas duas épocas de plantio. Uma menos ampla, no início da primavera, e outra, mais longa, no verão, quando as condições de temperatura e umidade são favoráveis à boa e rápida emergência dos colmos (Marchiori, 2004).

Barbieri e Villa Nova (1982) afirmam que na região centro-sul, o plantio da cana-de-açúcar é feito em duas épocas, conhecidas como “plantio de cana de ano” e “plantio de cana de ano e meio”. O plantio feito em setembro-outubro permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 11 a 14 meses, e é conhecida como “cana de ano”. O plantio feito em janeiro-março permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 15 a 20 meses, e é conhecida como “cana de ano e meio”. Na maior parte da região Nordeste o plantio se faz de junho a fevereiro e a colheita de setembro a março, correspondendo em períodos o final da estação chuvosa e início e boa parte da estação seca.

Na região Centro-Sul, a cana de ano, plantada em setembro-outubro tem seu máximo desenvolvimento de novembro a abril, diminuindo em seguida, devido às condições adversas do crescimento, podendo ser colhida, dependendo da variedade, a partir de julho. A cana de ano e meio, plantada em janeiro-março, tem um crescimento inicial no primeiro período

chuvoso (fevereiro-abril), porém apresenta um acelerado crescimento no segundo período chuvoso (outubro-abril) e, embora não seja colhida no ano safra em que foi plantada, o seu rendimento é praticamente o dobro da produtividade da cana de ano (Castro, 1999).

A influência da água para a cana-de-açúcar é grande, sendo que a germinação e o perfilhamento são os estágios mais críticos ao déficit hídrico, como foi enfocado anteriormente. Isso tem muito a ver com a época de plantio. No caso do Nordeste, o período de plantio coincide com o final da estação chuvosa o que certamente acarreta prejuízos no enraizamento e perfilhamento da cana planta e no perfilhamento da cana soca, prejudicando inclusive a aplicação dos fertilizantes químicos, uma vez que a chegada da estação seca inviabiliza essa operação geralmente, quando se trata de adubação da cana soca (Felipe, 2008).

## **2.2. Uso de Geotecnologias**

Também conhecidas como "geoinformação", as geotecnologias são o conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e oferta de informações com referência geográfica. As geotecnologias são compostas por soluções em *hardware*, *software* e *peopleware* que juntos constituem poderosas ferramentas para tomada de decisões (Rosa, 2005). Dentre as geotecnologias podemos destacar: Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Cartografia digital, Sensoriamento Remoto (SR), Sistema de Posicionamento Global (GPS), Aerofotogrametria, Geodésia e Topografia, dentre outros (Favrin, 2009).

De acordo com Nascimento e Abreu (2012), a utilização e aplicação das ferramentas desenvolvidas pela geotecnologia vêm do fato que, tanto no espaço urbano, quanto no rural, estas podem ser utilizadas como um meio de controle, conhecimento e coerência em relação ao uso e ocupação da terra. Os dados obtidos por meio destas tecnologias podem ser um importante instrumento para compor o planejamento rural por parte do poder municipal, regional, estadual e federal. O uso das geotecnologias tornam-se atrativos devido aos custos relativamente baixos de implementação, facilidade no desenvolvimento e agilidade na aquisição de resultados.

Segundo Castanho (2006), o entorno das geotecnologias é muito mais amplo do que se estabelece, não somente como mero instrumental para mapeamentos, localizações pontuais e outros, mas sim um conjunto de fatores que levam a resultados almejados por diferentes profissionais.

De acordo com Monzane (2008), diversas são as possibilidades de aplicações de geotecnologias no agronegócio e agricultura. O uso de softwares específicos e imagens de

satélite permitem monitorar e prever safras. Da mesma forma, o conhecimento de coordenadas geográficas possibilita planejamento e uso do solo, gestão das bacias hidrográficas e detecção de pragas.

No caso do uso de geotecnologias voltado ao mapeamento de lavouras, o comportamento da vegetação é uma feição importante a ser analisada, o que envolve fatores como estrutura e fenologia da planta, propriedades físicas e químicas do solo na superfície, condições atmosféricas, regime de irrigação, calendário de plantio da cultura, dimensões das áreas plantadas, resolução espacial e temporal das imagens disponíveis (Sousa et al., 2011).

### **2.3. Sensoriamento Remoto**

Segundo Florenzano (2002) a origem do Sensoriamento Remoto está vinculada ao surgimento da fotografia aérea. Por isso, sua história pode ser dividida em dois períodos: um de 1860 a 1960, baseado no uso de fotografias aéreas e, outro, de 1960 aos dias de hoje, caracterizado por uma variedade de tipos de fotografias e imagens. O SR é fruto de um esforço multidisciplinar que integra os avanços da Matemática, Física, Química, Biologia e das Ciências da Terra e da Computação. A evolução das técnicas de SR e a sua aplicação envolvem um número cada vez maior de pessoas de diferentes áreas do conhecimento.

Segundo Novo (2008), Sensoriamento Remoto pode ser definido como a aquisição de informação sobre um objeto a partir de medidas feitas por um sensor que não se encontra em contato físico direto com ele. Há mais de 35 anos pesquisadores vêm estudando o potencial de seu uso aplicado à agricultura. Fernandes (2009) relata que nas décadas de 60 e 70 pesquisadores do Agricultural Reserch Service (ARS) do United States Department of Agriculture (USDA) investigavam as características morfológicas de culturas e suas propriedades espectrais, assinaturas espectrais para espécies naturais e cultivadas bem como características espectrais de plantas saudáveis e sob condições de stress.

Portillo et al. (2003) afirmaram que o sensoriamento remoto fornece um amplo conjunto de técnicas úteis para caracterizar fenômenos dinâmicos que acontecem nas áreas agrícolas. Atualmente, é crescente a quantidade de estudos desenvolvidos a partir de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento, os quais podem resultar em melhorias na detecção, monitoramento e previsão de safra de culturas como a da cana-de-açúcar. Os estudos têm focado a identificação de áreas ocupadas por lavouras (Gleriani et al., 2005; Xavier et al., 2006), a relação entre índice de vegetação e precipitação (Aguilar et al., 2007; Lucas e Schuler, 2007), a estimativa de evapotranspiração (Andrade, 2008), a discriminação de variedades (Fortes, 2003; Galvão et al., 2005), a estimativa de produtividade

(Andrade, 2008; Fortes, 2003; Machado, 2003; Pellegrino, 2001; Picoli et al., 2007; Pontes et al., 2005), a relação com índices agroclimáticos (Gonçalves, 2008), a identificação de estágios fenológicos (Lucas e Schuler, 2007; Pellegrino, 2001) e a estimativa de características biofísicas, como índice de área foliar e biomassa (Andrade, 2008; Pellegrino, 2001; Simões, 2004), colorimetria de solos (Campos e Demattê, 2004; Demattê et al., 2011) além de fornecer subsídios para o manejo agrícola em nível de país, estado, município ou ainda microbacia ou fazenda (Rudorff e Moreira, 2002).

## 2.4. Comportamento espectral

A luz incidente sobre a superfície vegetal em seu espectro total pode ser refletida, absorvida ou transmitida. As quantidades relativas refletidas, transmitidas e absorvidas são função da superfície e variam em cada comprimento de onda, como ilustrado na Figura 1 (Bredemeier, 2005).

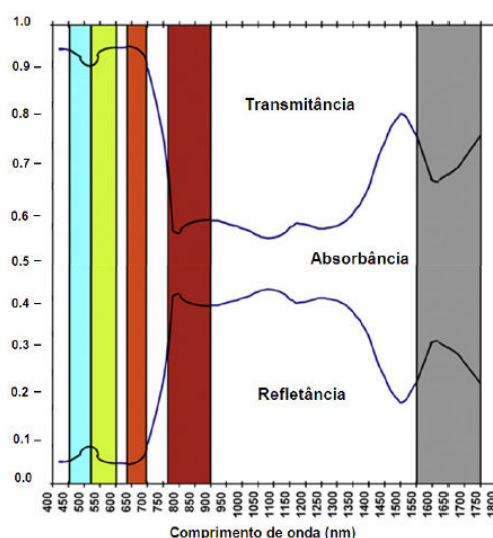


Figura 1. Características ópticas (absorbância, refletância e transmitância) de uma folha verde como função do comprimento de onda detectado. Adaptado de (Bredemeier, 2005).

A reflectância vegetal é afetada pela estrutura interna das folhas (Eitel et al., 2008), fundamentalmente em função da dispersão no mesófilo das folhas (Woolley, 1971) (Figura 2).

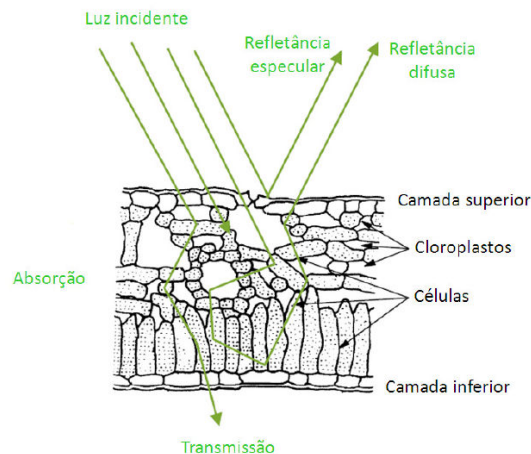


Figura 2. Interação conceitual entre folha da cultura e luz.  
Fonte: Portz (2011).

Da luz que incide sobre a folha do vegetal, parte é prontamente refletida pela camada superior da folha (reflectância especular) a outra parte sofre interações, sendo que parte da luz que penetra é absorvida no mesófilo, parte transpassa a folha se perdendo e finalmente a última parte é refletida como radiação difusa. Esse comportamento é distinto em diferentes comprimentos de onda (Jackson e Huete, 1991), o que forma a base para o uso de bandas do espectro como fonte de informação.

Moreira (2001) relata que além dos fatores morfológicos (densidade da cobertura vegetal, distribuição horizontal e vertical das folhas e ângulo de inserção foliar), fatores fisiológicos influenciam na resposta espectral das plantas. Dentre os fisiológicos tem-se idade da planta, déficit hídrico, tipo e espessura das folhas e nutrientes. Quanto mais velha for a planta, menos pigmento (especialmente clorofila) possuirá em suas folhas, o que resulta em maior reflectância nas regiões do visível e infravermelho médio. Quando a planta se encontra em situação de estresse hídrico ela fecha os seus estômatos o que reduz também a taxa fotossintética, conseqüentemente há uma queda na absorção de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Isto indica que plantas saudáveis refletem mais energia do que plantas em condições desfavoráveis.

Segundo Abdel-Rahman e Ahmed (2008), diversos trabalhos foram realizados com o intuito de estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar com base em modelagem matemática e dados de SR; porém, nenhuma delas resultou em uma metodologia viável para o uso operacional. Os autores ainda relatam que não existem modelos de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar que gerem estimativas confiáveis; pois, de acordo com Batchelor et al. (2002), os modelos têm limitações para estimar perdas provocadas pelos diversos fatores que compõem a produtividade agrícola.

## 2.5. A cor

A cor é uma sensação causada pela reflexão dos raios luminosos incidentes em um determinado objeto, percebida pelo órgão da visão e interpretada pelo cérebro (Ribeiro, 2007). As cores, nas mais diversas situações, auxiliam o homem a entender e interagir com o mundo que o rodeia.

Devido ao seu peculiar caráter abstrato, a cor pode ser definida de várias formas. Ela é uma característica de objetos que emitem, refletem ou transmitem radiação na faixa visível. (Pedrosa, 2006)

Segundo Guimarães (2004), a cor é definida por três características: a matiz ou tonalidade, o brilho ou luminosidade e a saturação ou croma. A matiz é a cor definida pelo comprimento de onda. O brilho é a luminosidade da cor, referente à proximidade do branco ou preto. A croma é definida como sendo o grau de pureza da cor.

A Colorimetria é a ciência da medição da cor (Minolta, 2007; Lopes, 2009). Através da colorimetria, a impressão sensorial cor deixa de ser subjetiva para ser objetiva, podendo ser expressa quantitativamente, de uma forma numérica, através de medição por reflectância de um determinado objeto (Fernandes, 2002). A introdução de uma representação matemática no processo de especificação de cor gera muitos benefícios já que permite a especificação de um espaço de cor através de um sistema de coordenadas cartesianas, geralmente conhecido como modelo de cor. Para a avaliação instrumental da cor utiliza-se normalmente um colorímetro triestímulo, o qual proporciona medições correlatas à percepção do olho humano (na faixa de 380 nm a 780 nm) (Freire, 2009). A colorimetria não é tão conhecida como seria de se esperar, apesar de tratar da cor, um assunto que faz parte do nosso cotidiano e se apresenta em praticamente todas as nossas atividades. É visível a surpresa de muitas pessoas quando tomam conhecimento de que é possível se medir a cor (Silva, 2004).

Um parâmetro freqüentemente utilizado em colorimetria é a reflectância ( $R\lambda$ ), que representa a relação entre os raios de luz refletidos pelo objeto e os raios de luz refletidos por uma amostra de branco padrão, identicamente iluminados, para os diversos comprimentos de onda do espectro, como afirma Macdougall (2002). Uma aproximação prática para a amostra de branco padrão é o sulfato de bário e o já obsoleto óxido de magnésio. Modernamente, utiliza-se o teflon (Spectralon, Halon) (Silva, 2004).

O sistema CIE é um sistema quantitativo para medir, especificar e denotar as cores classificando-as de acordo com suas propriedades perceptivas (Torquinst, 2008).

Tornquist (2008) coloca que o sistema CIE proporciona uma base objetiva para a medição de cor e especifica a cor por meio de misturas aditivas dos três estímulos das três

cores de referência (vermelho, verde e azul). Por suas características de capacidade analítica e objetividade é muito usado para o método de análise espectral da luz refletida, reemitida ou absorvida de um objeto, que é feita com a utilização de um espectrofotômetro.

Leite (2006) define que o modelo de cor CIE XYZ é baseado nas três cores X (vermelho), Y (verde) e Z (azul). Onde os três valores especificam as quantidades de cores para se descrever uma cor do espectro de luz visível. Foi criado devido a não existir um conjunto de valores finitos para expressar as possíveis cores visíveis. O modelo CIE XYZ é o modelo gerado a partir das funções de matização de cores, e a com a utilização de fórmulas matemáticas é possível se obter outros modelos conhecidos.

Esse espaço de cores apresenta um inconveniente: a distâncias iguais não correspondem diferenças iguais de cores. Se o diagrama fosse visualmente uniforme, as linhas de tonalidade constante seriam retas e as cores de croma constante formariam círculos concêntricos, o que não ocorre na prática. Para superar essas dificuldades, foi criado o espaço CIELAB, cuja disposição é apresentada na Figura 3.

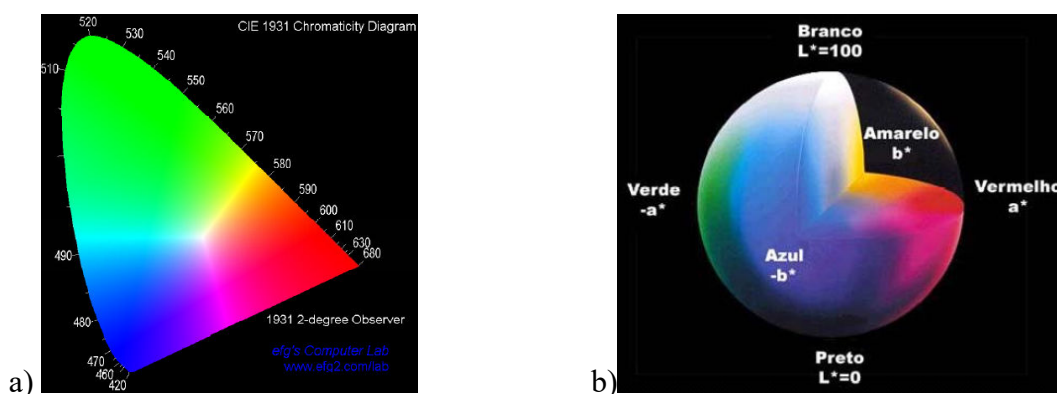


Figura 3. (a) Diagrama de cromaticidade. (b) O espaço CIELab.

Fonte: Folheto Minolta. [www.minolta.com](http://www.minolta.com)

Da Figura 3, observa-se que o espaço CIELAB é composto de três eixos. O vertical, que representa a luminosidade e varia de 100 (branco) a zero (preto). O eixo a varia de +a (vermelho) a -a (verde), assumindo valores para cores de objetos reais de, aproximadamente, -170 a +110. O eixo b varia de +b (amarelo) a -b (azul), assumindo valores para cores de objetos reais de cerca de -110 a +160 (Alonso, 2008).

## 2.6. O sensor MODIS

Com o objetivo de melhor compreender o nosso planeta Terra, o programa EOS (Earth Observing System) lançou alguns satélites com vários sensores inovadores, dentre eles o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) que se encontra a bordo

dos satélites TERRA, lançado em dezembro de 2000, e AQUA, lançado em maio de 2002, com bandas desde o visível até o infravermelho termal (Rudorff et al., 2007).

O MODIS é um dos cinco instrumentos do satélite TERRA, formalmente conhecido como EOS-AM. Os outros sensores a bordo deste satélite são: CERES, ASTER, MISR e MOPITT. O sensor MODIS foi projetado para satisfazer os requerimentos de três campos de estudos: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para estes objetivos e uma cobertura global quase diária (a cada 1-2 dias) (Justice et al., 2002).

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais, sendo 2 com resolução espacial de 250 m, 5 com 500 m e 29 com 1.000 m no nadir, cobrindo uma faixa de 2.330 km de largura (Tabela 1) (Huete et al., 2002). A distribuição das 36 bandas espectrais, ao longo do espectro eletromagnético, em função de comprimentos de ondas diferenciados, permitiu o desenvolvimento de 44 produtos, utilizados por pesquisadores de diversas áreas do conhecimento. Com base nos produtos deste sensor, tal como o MOD13 (índices de vegetação NDVI e EVI) e MOD15 (Índice de Área Foliar - LAI e Fração Fotossinteticamente Ativa da Vegetação - FAPAR), a análise de alvos como a vegetação natural, pastagem e cultura agrícola passam a ser realizadas numa escala multitemporal, melhorando o entendimento deste bioma no que diz respeito à sua estrutura, funcionamento e papel ecológico (Ferreira et al., 2006).

Tabela 1. Características gerais do instrumento MODIS.

|                                            |                                                                                               |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Órbita                                     | 705 km, sol-síncrona, quase-polar, cruzando o Equador às 10:30 h (Terra) e às 13:30 hs (Aqua) |
| Faixa de imageamento                       | 2330 km $\pm$ 550 cross-track                                                                 |
| Bandas espectrais                          | 36 bandas, entre 405 e 14.385 nm, com calibração a bordo                                      |
| Taxa de dados                              | 11 Mbps (pico)                                                                                |
| Resolução radiométrica                     | 12 bits                                                                                       |
| Resolução espacial (a nadir)               | 250 m (bandas 1 e 2)<br>500 m (bandas 3 a 7)<br>1000 m (bandas 8 a 36)                        |
| Repetitividade                             | Diária (para latitudes norte acima de 30°)<br>2 dias (para latitudes abaixo de 30°)           |
| Precisão de geolocalização                 | < 150 m (1 sigma) a nadir                                                                     |
| Registro entre bandas para as bandas 1 a 7 | < 50 m na direção transversal<br>< 100 m na direção da linha de vôo                           |

Fonte: Rudorff et al. (2007).

De acordo com Aguiar (2007), os produtos Modis são disponibilizados em forma de *Tiles* ou quadrantes que tomam como base uma grade de projeção sinusoidal com uma área de 10° de latitude por 10° de longitude (aproximadamente 1200 km por 1200 km na linha do Equador). Estas imagens são fornecidas no formato HDF (Hierarchical Data Format), que é ainda pouco conhecido, o que dificulta o processamento dos dados neste formato, sendo necessário programas específicos disponibilizados para tal fim, como é o caso do MRT (MODIS Reprojection Tool).

Este sensor possui um maior número de bandas espectrais que os outros imageadores de baixa - média resolução espacial já lançados (Soares et al., 2007). No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui em Cuiabá (MT) uma estação de recepção de dados do sensor MODIS, que cobre boa parte da América do Sul (Rafaelli et al., 2006).

Vários tipos de estudos têm sido desenvolvidos a partir de dados MODIS, principalmente para áreas agrícolas, entre eles, o trabalho de Goltz (2007), cujo objetivo era verificar se o produto de reflectância da superfície (MOD09), fornecido pelo sensor MODIS, possuía confiabilidade e precisão para o monitoramento de áreas de soja. O estudo concluiu que quando comparado a dados de campo, naquelas condições, o produto MOD09 apresentou resultados satisfatórios.

Em outro estudo, realizado para lavouras de café do Estado do Paraná, Rafaelli e Moreira (2007) apresentaram como objetivos avaliar o potencial dos dados MODIS para detectar a abrangência da área cafeeira atingida pela geada e avaliar o potencial das imagens MODIS para detectar mudanças no comportamento espectral de áreas cafeeiras em tempo hábil. Diante das conclusões alcançadas, os autores recomendam empregar imagens MODIS para avaliar qualitativamente o impacto da geada e, para quantificar a área de café atingida, deve-se usar imagens de melhor resolução espacial, como as do TM/LandSat ou CCD/CBERS.

## **2.7. Análise Discriminante**

A análise discriminante (AD) é uma técnica multivariada utilizada quando a variável dependente é categórica, ou seja, qualitativa (não métrica) e as variáveis independentes são quantitativas (métricas) (Pamplona, 2011).

O objetivo principal da AD é identificar as variáveis que discriminam os grupos e, assim, elaborar previsões a respeito de uma nova observação, identificando o grupo mais adequado a que ela deverá pertencer, em função de suas características. Para alcançar esse

objetivo, a AD gera funções discriminantes (combinações lineares das variáveis) que ampliam a discriminação dos grupos descritos pelas variáveis dependentes (Fávero et al., 2009).

Quando o pesquisador estiver interessado em estudar somente dois grupos de variáveis dependentes, a técnica é chamada de Análise Discriminante Simples. No entanto, em muitos casos, há o interesse na discriminação entre mais de dois grupos, sendo a técnica, assim, denominada de Análise Discriminante Múltipla (MDA).

Os objetivos principais desses dois tipos de análises são parecidos: (i) identificar as variáveis que melhor discriminam dois ou mais grupos; (ii) utilizar estas variáveis para desenvolver funções discriminantes que representem as diferenças entre os grupos; (iii) fazer uso das funções discriminantes para o desenvolvimento de regras de classificação de futuras observações nos grupos (Pamplona, 2011).

Dois métodos computacionais podem ser utilizados para determinar uma função discriminante: o método simultâneo e o método *stepwise*. A estimação simultânea considera a inclusão de todas as variáveis explicativas conjuntamente no modelo, mesmo quando uma ou mais delas não forem significativas.

Já o procedimento *stepwise*, por outro lado, é utilizado quando o pesquisador deseja avaliar a significância estatística das variáveis por meio da inclusão passo a passo apenas das variáveis significantes. Este procedimento oferece diversos métodos de seleção (inclusão ou exclusão de variáveis) discriminantes na função discriminante e, entre eles, merecem destaque o método de lambda de Wilks, o  $D^2$  de Mahalanobis, o Smallest F ratio (Razão F entre os grupos), o V de Rao e o método Unexplained Variance, que são descritos, conforme Maroco (2007), Sharma (1996) e Fávero et al. (2009).

Angelo, Castro e Hosokawa apud Batista (1990) afirmam que, quando se trata de estudos de vários parâmetros observados, ou medidos sobre um mesmo indivíduo ou unidade amostral, se pode recorrer aos métodos de análises multivariadas com o intuito de melhor explicar a estrutura da massa de dados, sendo os métodos mais comumente usados a Análise Fatorial, a Análise de Grupamentos e a Análise Discriminante.

Nanni et al. (2004) buscando desenvolver e avaliar um método para a discriminação das classes de solos a partir de suas respostas espectrais, utilizando-se um sensor em laboratório, obtiveram resultados que demonstraram que as classes de solos podem ser individualizadas e distinguidas pela análise discriminante.

Também, Demattê et al. (2005), com o objetivo de avaliar o potencial de discriminação de solos, por meio de informações espectrais obtidas pelo sensoriamento

remoto por satélite, concluíram que a metodologia empregada mostrou-se eficiente, tornando possível discriminar os solos da região estudada.

Diversos trabalhos na área de biologia do solo, especialmente sobre fauna do solo, têm utilizado técnicas de análise multivariada (Baretta et al., 2003; Moço et al., 2005), a fim de buscar maior entendimento das relações existentes entre os componentes da fauna, além de identificar quais atributos biológicos mais contribuem para discriminar sistemas de manejo (Baretta et al., 2005).

### 3. REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, July 2008.
- AGUIAR, D. A. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do Sensor MODIS**. São José dos Campos: INPE, 2007. 99 p. Dissertação (Mestrado).
- AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; FEITOSA, F. F.; GONÇALVES, F. G.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Análise espacial da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: a influência da precipitação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2231-2238.
- ALONSO, H. S. M. P. Estudo do efeito do tratamento por laser de CO<sup>2</sup> nas propriedades superficiais de fibras sintéticas. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, Braga.
- ANDRADE, L. A. de B. **Cultura da cana-de-açúcar**. In: CARDOSO, M. das G. (Ed.) Produção de aguardente de cana-de-açúcar. Lavras: UFLA, 2001. p. 19-49.
- ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar**. 2008. 164 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- AZEVEDO, J. C. G.; PEREIRA, J. C.; QUEIROZ, A. C.; CARNEIRO, P. C. S.; LANA, P. L.; BARBOSA, M. H. P.; FERNANDES, A. M.; RENNÓ, F. P. Composição químico-bromatológica, fracionamento de carboidratos e cinética da degradação in vitro da fibra de três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Rev. Bras. de Zootecnia**, v. 32, n. 6, p. 1443-1453, 2003.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR, Coordenadoria Regional Sul, 1982. 36 p.
- BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; FIGUEIREDO, S.R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:715-724, 2005.
- BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; MAFRA, A.L.; WILDNER, L.P.; MIQUELLUTI, D.J. Fauna edáfica avaliada por armadilhas de catação manual afetada pelo manejo do solo na região oeste catarinense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.2, p.97-106, 2003.
- BATCHELOR, W. D.; BASSO, B.; PAZ, J. O. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 141-158, Dec. 2002.
- BATISTA, J. L. M. Análise multivariada no planejamento de extensão florestal: subsídios para uma política de reocupação de áreas. Curitiba: UFPR, 1990. 137p. Dissertação - (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1990.
- BRASIL. Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento. Assessoria de Gestão Estratégica. **Projeções do agronegócio mundial e Brasil 2006/07 a 2017/18**. Brasília, DF: AGE, 2008. 58p.

BREDEMEIER, C. **Leaf-induced chlorophyll fluorescence as a tool for site-specific nitrogen fertilization: evaluation under controlled environmental and field conditions in wheat and maize**. Munique: Die Deutsche Bibliothek, 2005. 219 p.

CAMPOS, R.C.; DEMATTÊ, J.A.M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.853-863, 2004.

CASTANHO, R.B. **Uso do geoprocessamento no estudo da produção agropecuária da microrregião de Carazinho-RS**. 237p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: Semana da Cana-de-Açúcar de Piracicaba, 4., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Saccharum, 1999. v. 1, p. 12-16.

CESAR, M. A. A.; SILVA, F. C. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira**. Piracicaba, ESALQ, 1993. 108p.

Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2012**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: CONAB 2012.

DEMATTÊ, J. A. M.; BORTOLETTO, M. A. M.; GUSTAVO M. VASQUES, G. M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.590-597, 2011

Demattê, J.A.M.; Moreti, D.; Vasconcelos, A.C.F.; Genú, A.G. Uso de imagens de satélite na discriminação de solos desenvolvidos de basalto e arenito na região de Paraguaçu Paulista. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.40, n.7, p.697-706, jul. 2005

DINARDO-MIRANDA, L.L.; PIVETTA, J.P.; FRACASSO, J.V. Economic injury level for sugarcane caused by the spittlebug *Mahanarva fimbriolata* (Stål) (Hemiptera:Cercopidae). **Scientia Agricola**, v.65, p.16-24, 2008.

EITEL, J.U.H. Combined spectral index to improve ground-based estimates of nitrogen status in dryland wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 6, p. 1694-1702, Nov./Dec. 2008.

ERNESTO, V. A. R. T. **Caracterização térmica do bagaço da cana-de-açúcar visando aproveitamento energético**. Araraquara, 2009. 115p. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FaoStat**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: 5 dez. 2012.

FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P., SILVA, P., CHAN, B. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. 1.ed. Rio de Janeiro: Campos. Elsevier, 2009. 544p.

FAVRIN, V. G. As geotecnologias como instrumento de gestão territorial integrada e participativa. 231f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

FELIPE, D. C. **Produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. Areia, PB:UFPB/CCA, 2008. 70p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba- Centro de Ciências Agrárias.

FERNANDES, A.C. **Protótipo de visualização para modelos de cor para medição de objetos em espectrofotômetros por refletância**. 2002. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências da Computação) - Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

FERNANDES, J. L. **Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de imagens Spot vegetation e dados meteorológicos**. Campinas, SP, 2009. 114p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

FERREIRA, M.E.; FERREIRA, L.G.; HUETE, A.R.; PECCININI, A.A. Análise comparativa dos produtos Modis ecologia para o monitoramento biofísico ambiental do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica** (2006) 24(2): 251-260

FERREIRA, R. V. **Uso da análise multivariada para caracterização de comunidades infestantes em cana-soca**. Jaboticabal, 2009. 64p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

FERRO, M.I.T.; BARROS, N.M. DE; DABBAS, K.M.; LAIA, M.L. DE; KUPPER, K.C; MORAES, V.A. DE; OLIVEIRA, J.C.F. DE; FERRO, J.A.; ZINGARETTI, S.M. Análise do perfil de expressão dos genes da cana-de-açúcar envolvidos na interação com *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*. **Summa Phytopathologica**, v.33, p.157-166, 2007.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

Food and Agricultural Organizations of the United Nations – FAO. **Food and Agricultural commodities production**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: dez/2012.

FORTES, C. and DEMATTÊ, J.A.M., Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. **International Journal of Remote Sensing**, 27, p. 395–1412. 2006,

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/LANDSAT7**. Piracicaba, 2003. 131p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

FRASSON, F. R. **Utilização de sensor ótico ativo em cana-de-açúcar**. Piracicaba, 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A. **Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. Scientia Agrícola, v.54, p., 1997.

GLERIANI, J. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; SILVA, J. D. S. Classificação espectro-temporal de culturas agrícolas tropicais: tolerância de dois modelos de redes neurais a dados falhos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 151-158.

GOLTZ, E.; MOREIRA, M.A.; Alvarenga, B.S.; Rodrigues, J.L.Y. Avaliação do produto (MOD09) originado do sensor MODIS/TERRA através de radiometria de campo em uma área de soja. **Anais...** XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 213-220.

GONÇALVES, R. R. V. **Relação entre a resposta espectral da cana-de-açúcar, registrada nas imagens dos satélites AVHRR/NOAA, em São Paulo, e dados agroclimáticos, no período de 2001 a 2008**. 2008. 185 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas.

GUIMARÃES, L. **A cor como informação: a construção biofísica, lingüística e cultural da simbologia das cores**. 3. ed. São Paulo: Annablume, 2004.

- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n.1, p. 195-213, 2002.
- JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. **Interpreting vegetation indexes**. Preventive Veterinary Medicine [S.I.], v. 11, n. 3/4, p. 185-200, 1991.
- JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.3-15, 2002.
- KUVA, M. A. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana de açúcar. III - Capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) e capim-colonião (*Panicum maximum*). **Planta Daninha**, v.21, p.37-44, 2003.
- LANDELL, M.G.A.; PINTO, L.R.; CRESTE, S.; XAVIER, I.A.; VASCONCELOS, A.C.M.; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA, D.N.; SILVA, M.A. Seleção de novas variedades de cana-de-açúcar e seu manejo de produção. **Informações Agrônomicas**. Potafos, n.110, p.18-24, 2005.
- LEITE, F. N. **Calibração de dispositivos de cores utilizando uma câmera digital**. 2006. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília.
- LOPES, L. C. **Controle metrológico da cor aplicado à estamperia digital de materiais têxteis**. 2009. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- LUCAS, A. A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 607-614, 2007.
- MACDOUGALL, D.B. **Colour in food: improving quality**. New York: CRC Press, 2002, 366 p.
- MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 - ETM+**. 2003. 74 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas.
- MARCHIORI, L. F. S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 275 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MAROCO, J. **Análise estatística com a utilização do SPSS**. 3.ed. Lisboa: Lisboa. 2007. 822p.
- MINOLTA. **Precise color communication: color control from perception to Instrumentation**. Japan: Minolta Co. Ltd., 2007. 59 p.
- MOÇO, M.K.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CORREIA, M.E.F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.555-564, 2005.
- MONZANE, M.R.G. **O Uso de geotecnologias na gestão agrícola: um estudo aplicado ao processo de inspeção na citricultura**. 147p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, USP: São Carlos, 2008.

- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 63-91, 157-166. 250 p. 2001.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. FIORIO, P. R. Análise discriminante dos solos por meio de resposta espectral no nível terrestre. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.10, p.995-1006, 2004
- NASCIMENTO, H.R.; ABREU, Y. V. Geração de informações sobre a agricultura de energia por meio das geotecnologias. **INTERAÇÕES**, Campo Grande, v. 13, n. 2, p. 181-189, jul./dez. 2012.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo. 3ª Ed. Edgard Blucher, 2008. 362p.
- OLIVEIRA, M. S. **Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) à toxidez por alumínio em solução**. São Carlos: UFSCar, 2012. 109 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos.
- PAMPLONA, V.M.S. **Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí**. Belém, 2011. 139p. Dissertação (Mestrado).
- PAZ, A. R.; VICTORIA, D.C.; OLIVEIRA, A.F.; ANDRADE, R.G. Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir de índices espectrais de vegetação. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. 31p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. **Documentos**, 76).
- PEDROSA, T. M. C. **Significado e significante da cor no processo informacional: estudo aplicado na construção de interfaces digitais para a web**. 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia. Instituto de Ciência da Informação.
- PELLEGRINO, G. Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 2001. 133 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PELLEGRINO, G.Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 2001. 114p. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; VON ZUBEN, F. J. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar: estudo de caso Usina Catanduva**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 217-224.
- PINO, F. A. **Tendências em informações Agropecuárias**. Foz do Iguaçu, 2001. Palestra realizada no X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2001.
- PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 331-333.
- PORTILLO, J.E.; EPIPHANIO, J.C.N.; GÜRTLER, S.; BARRETO LUIZ, A.J. Evolução da superfície cultivada com as principais culturas agrícolas em Guará, Ipuã e São Joaquim da Barra - SP, via imagens de satélite. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO

REMOTO, 11, Belo Horizonte - MG, Brasil, abr. 2003, **Anais...** São José dos Campos: INPE. p. 215-222.

PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônomo para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar.** Piracicaba, 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.

Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar - PMGCA. **Variedades RB de Cana-de-Açúcar.** CCA/UFSCar. 2008. 31p.

RAFAELLI, D.R.; MOREIRA, A.M. **Deteção de geada em lavouras de café.** In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Eds.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 145-151.

RAFAELLI, D.R.; MOREIRA, M.A.; FARIA, R.T. Análise do potencial de dados Modis para monitorar o impacto de geada em nível estadual e em lavouras de café. **Agric. São Paulo**, São Paulo, v. 53, n. 1, p. 5-15, jan./jun. 2006.

RIBEIRO, S. C. A.; RIBEIRO, C. F. A.; PARK, K. J.; ARAUJO, E. A. F.; TOBINAGA, S. Alteração da cor da carne de Mapará (*Hypophthalmus edentatus*) desidratada osmoticamente e seca. **Rev. Bras. de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.9, n.2, p.125-135, 2007.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar.** Botucatu: Universidade Estadual Paulista - UNESP, 1995. 69 p.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, 16 81-90. 2005.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F. Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Informações Agronômicas**. Potafos, n.110, p. 6-11, 2005.

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.** 114p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1985.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura. INPE – São Jose dos Campos. 2002. Disponível em: <[http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.14/doc/CAP9\\_MAMoreira](http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.14/doc/CAP9_MAMoreira)> Acesso em 12 dez. 2012.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientais no Brasil.** São Jose dos Campos, SP: Editora Parêntese, cap. 2, p 23-35, 2007.

SALDANHA, E.C.M.; ROCHA, A.T. DA; OLIVEIRA, E.C.A. DE; NASCIMENTO, C.W.A. DO; FREIRE, F.J. Uso do gesso mineral em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Caatinga**, v.20, 2007.

SHARMA, S. **Applied Multivariate Techniques.** Hoboken: John Wiley e Sons, 1996.

SILVA, G. B. C. **Propagação de erros e cálculo da incerteza de medição em resultados espectrofotométricos.** 93 p. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2004. Dissertação (Mestrado). Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SILVA, G. B. C. **Propagação de erros e cálculo da incerteza de medição em resultados espectrofotométricos**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2004. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SIMÕES, M. S. **Relação entre indicadores de crescimento e de produção da cana-de-açúcar e dados espectrais terrestres e orbitais**. 2004. 117 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SOARES, J.V.; BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Eds.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 03-21.

SOUZA, L.M.M.; SOUZA, A.L.F.; AMARAL, G.M.; PIFFER, T.R.O.; SOUZA, A.O.; SANTOS, E.C.; OLIVEIRA, C.C. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao mapeamento das lavouras de cana de açúcar das províncias de Tucumán, Salta e Jujuy na Argentina. **Anais...** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.354.

TORNQUIST, Jorrit. **Color y luz: teoria y práctica**. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 47, p. 656–662, 1971.

XAVIER, A. L.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 27, n. 4, p. 755-768, 2006.

#### 4. CAPÍTULO 1

### **Análise discriminante de variedades de cana-de-açúcar por meio da resposta espectral no nível terrestre**

## RESUMO

Este capítulo objetivou classificar variedades de cana-de-açúcar em grupos homogêneos por meio da análise discriminante a partir de suas respostas espectrais, utilizando-se um sensor em laboratório, foram desenvolvidos modelos estatísticos para discriminar seis variedades (RB 845156, RB 966928, RB 835054, RB 855453, RB 72454 e RB 855536) pertencentes a diferentes grupos de maturação (precoce, médio e tardio) e duas posições de folhas diagnósticas (+1 e +3) de cana-de-açúcar em uma área no noroeste do Estado do Paraná. A resposta espectral foi obtida a partir de 100 amostras de folhas por talhão para cada posição em duas safras, 2011/12 e 2012/13. Os resultados demonstraram que as variedades puderam ser individualizadas e distinguidas pela análise discriminante com 0% de confusão e com 100% de acerto. O método auxiliou na discriminação das variedades pela sua reflectância, devido às interações físicas com a energia eletromagnética.

Palavras-chave: Curva espectral. Funções lineares. Espectrorradiometria.

## **ABSTRACT**

This chapter aims at classifying sugar cane varieties in homogeneous subsets by means of discriminant analysis which in turn takes into account the spectrum frequencies obtained through the use of a lab sensor. Six varieties (RB 845156, RB 966928, RB 835054, RB 855453, RB 72454 and RB 855536) were identified by the statistical models as to different points of ripeness (raw, grown and overgrown) and two leaf position diagnoses (+1 and +3) of a sugar cane crop grown in a piece of land located in northwest of the Paraná province. Spectrum responses were obtained for 100 leaf samples harvested from two different seasons; 2011/12 and 2012/13. Analysis of the results indicates that the varieties could be gathered and distinguished by the discriminant analysis with 0% confusion and 100% rightness. Therefore, the method could be used to discriminate varieties by their reflectance due to physical interactions with electromagnetic energy.

Keywords: Spectral curve. Linear function. Spectroradiometry.

## 4.1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes da agricultura brasileira, atualmente ocupa a terceira posição em área plantada no país, ficando atrás apenas da soja e do milho (IBGE, 2010).

Na área canavieira, o sensoriamento remoto tem auxiliado no desenvolvimento de trabalhos que visam à identificação de variedades, sintomas de deficiências nutricionais e stress, classificação, mapeamento da produção e manejo (Almeida et al., 2002; Joaquim, 1998; Inamasu et al., 2006; Rudorff e Batista, 1990; Fiorio et al., 2000). Portillo et al. (2003) afirmaram que o sensoriamento remoto fornece um amplo conjunto de técnicas úteis para caracterizar fenômenos dinâmicos que acontecem nas áreas agrícolas. Assim sendo, a utilização desta técnica e particularmente a utilização de assinaturas espectrais das culturas agrícolas, pode contribuir como bons indicadores das condições gerais de vigor da cultura (Ferraz, 2005).

A utilização de dados de reflectância obtidos por meio de espectraloradiômetros, permite estabelecer padrões de resposta espectral de culturas agrícolas e de metodologia para identificação e gestão dessas culturas, sob condições mais favoráveis, em termos de influência atmosférica, comparativamente a dados coletados por sensores remotos a bordo de satélites (Deering, 1980 apud Ferraz, 2005; Papa, 2009).

O caráter multivariado dos dados provenientes de estudo nas ciências biológicas, ecológicas, agronômicas entre outros, aliado ao desenvolvimento contínuo da tecnologia computacional, tem levado ao crescente interesse no uso de métodos multivariados (Coimbra, 2007). A Análise Discriminante (AD) é uma técnica de análise multivariada freqüentemente utilizada com o objetivo de diferenciar populações e ou classificar objetos em populações pré-definidas (Barroso e Artes, 2003). Esta técnica surgiu há mais de 60 anos atrás, e a sua utilização na área agronômica vem crescendo rapidamente (Coimbra, 2007).

Em 1990, inicialmente houve um modesto entusiasmo para se empregar, de modo aplicado, esta técnica de análise em dados biológicos (Cruz e Carneiro, 2003). Recentemente, vem crescendo a sua utilização na interpretação de modo conjunto das variáveis quantitativas

Pamplona (2011) relata que a AD é uma técnica multivariada utilizada quando a variável dependente é categórica, ou seja, qualitativa (não métrica) e as variáveis independentes são quantitativas (métricas).

O objetivo principal da AD é identificar as variáveis que discriminam os grupos e, assim, elaborar previsões a respeito de uma nova observação, identificando o grupo mais

adequado a que ela deverá pertencer, em função de suas características. Para alcançar esse objetivo, a AD gera funções discriminantes (combinações lineares das variáveis) que ampliam a discriminação dos grupos descritos pelas variáveis dependentes (Fávero et al., 2009).

Freqüentemente, mais de uma variável-resposta pode ser observada em cada unidade experimental e, cada uma é oriunda do mesmo delineamento experimental.

A análise multivariada considera a dependência entre as variáveis-respostas (covariância), fato que na análise univariada não é contemplado. A utilização de apenas uma variável pode ser uma simplificação perigosa, não evidenciando de forma adequada as verdadeiras causas de variações intrínsecas aos dados do estudo, e deixando fora da análise a importante informação de covariabilidade entre as variáveis (Coimbra, 2007).

Essa ferramenta tem sido utilizada como um instrumento para levantamentos dos solos Demattê e Garcia (1999) e Demattê e Nanni (2003) demonstrando a possibilidade de prever classes de solos e seus limites na paisagem por meio da análise multivariada.

Johnson et al. (2005), foram capazes de identificar e distinguir sete variedades de cana. A pesquisa foi realizada pela obtenção de dados de reflectância hiperespectral utilizando uma espectrômetro sob condições de luz natural, e através da análise de pigmentos vegetais e realização de discriminação análise discriminante canônica.

Também, Johnson et al. (2008), estudando a reflectância hiperspectral (350 a 800 nm) e pigmentação de folhas de sete variedades de cana-de-açúcar para identificação e discriminação, observaram diferença na reflectância das folhas no comprimento de onda entre 560-720 nm, podendo ser usados para discriminar as variedades selecionadas, com diferença significativa de 76%. Mencionam ainda que o grau de discriminação pode ser aumentado para 86% através de índices de vegetação. A análise multivariada resultou em 95 - 100% de classificação correta para todas as variedades com dados de reflectância de folha e 76 - 81% de classificação correta com os dados de pigmentação.

Com dados do Hyperion EO-1, Apan et al. (2004) tentaram avaliar a discriminação de oito importantes variedades de cana australianas pela conversão do radiância no sensor em valores de reflectância da superfície, bem como o cálculo de algumas relações de reflectância e índices de vegetação potencialmente sensíveis para teor de clorofila, água na folha, e lignina-celulose. Usando análise discriminante múltipla (MDA), foi possível distinguir entre as variedades de cana com precisões de classificação para a amostra de pixels de 97% e 74% para cinco e oito variedades, respectivamente.

Galvão et al. (2005) usando dados hiperspectrais adquiridos pelo instrumento Hyperion, a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1), e aplicação de análise discriminante

múltipla (MDA) nos valores de reflectância, foi capaz de distinguir entre cinco variedades de canas brasileiras com uma exatidão de classificação de 87,5%.

Fortes e Demattê (2006) trabalhando com imagens Landsat ETM+ para discriminar entre quatro variedades de cana através da análise de bandas espectrais individuais e índices espectrais de vegetação. Eles desenvolveram equações discriminantes derivadas de múltiplas relações entre as bandas do sensor e os índices de vegetação e características específicas das variedades. Os resultados mostraram que as variedades de cana puderam ser identificados com 93,6% de certeza.

Nesse contexto se insere o presente estudo, tendo como objetivo a possibilidade de discriminação de seis variedades e duas posições de folhas de cana-de-açúcar, por meio de suas respostas espectrais.

## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado na área de abrangência da Cooperativa Agroindustrial Vale do Ivaí LTDA - COOPerval, sediada no município de Jandaia do Sul - PR, cuja área plantada com cana é de 16.000 ha, num raio em torno de 60 km em relação ao complexo industrial.

A área do estudo localiza-se no município de Bom Sucesso, Mesorregião do Norte Central Paranaense (Figura 1a), cujas coordenadas centrais são latitude 23°42'36"S e a longitude 51°45'50". A altitude varia de 520 a 580 m. O clima da região é o tropical de altitude, tipo Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, clima subtropical ou temperado úmido, sem estação seca e de verão longo e quente. Ocorrem de zero a três geadas noturnas por ano. A precipitação é superior a 1.400 mm ano<sup>-1</sup>.

De acordo com Nanni e Oliveira (2009), o solo predominante na área foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico.

A área é de aproximadamente 623,43 hectares cultivados com cana-de-açúcar (Figura 1a), sendo distribuídos em sessenta subáreas (talhões) de tamanhos e formas distintas situados em seis fazendas (microrregiões) (Figura 1b). Seis diferentes variedades de cana-de-açúcar (grupo de maturação precoce: RB 845156 e RB 966928; grupo de maturação médio: RB 835054 e RB 855453; grupo de maturação tardio: RB 72454 e RB 855536) e duas posições de folhas (+1 e +3) foram repetidas e coletadas aleatoriamente dentro dos respectivos talhões. As variedades referidas foram escolhidas em função de sua representatividade quanto ao volume de produção na região do estudo.

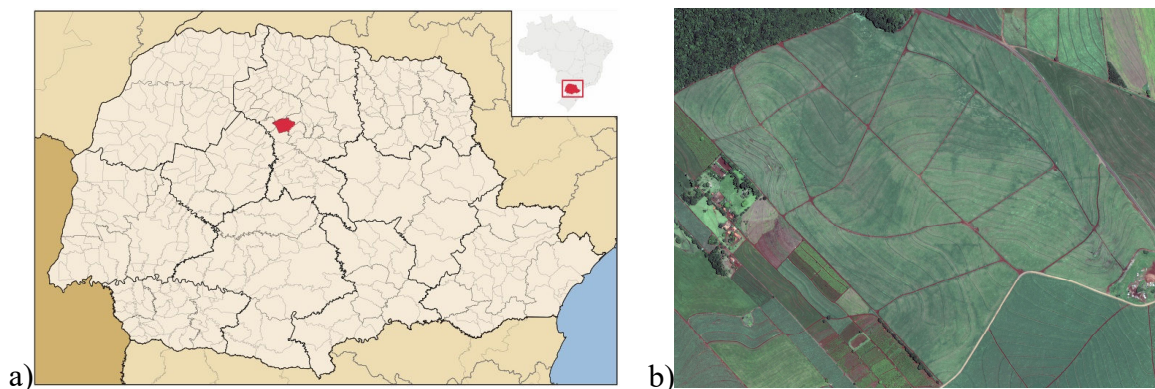


Figura 1. Mapa de localização da área do estudo (a) e o detalhamento da divisão interna em talhões (b).

Sistema de Projeção em Latitude-Longitude, Datum WGS-84.

#### 4.2.2. Amostragem

O início das campanhas de campo para aquisição das informações relativas as variáveis biofísicas da cana-de-açúcar e coleta das folhas, ocorreu a partir de abril de 2011.

Visando uma aplicação mais ampla do método desenvolvido no trabalho, optou-se por realizá-lo em cana-soca, já que no ciclo de vida total de um canavial a cana-soca é predominante. Nessa condição, o ciclo anual da cultura se completa em 12 meses, em média, o que facilita as análises comparativas da resposta espectral entre os diversos cortes da cana-soca. O trabalho foi realizado em duas safras agrícolas (2011/2012 e 2012/2013), onde o método aplicado à coleta de dados foi sendo aperfeiçoado e adaptado às condições do estudo de acordo com as análises preliminares bem como com a disponibilidade de recursos.

Como citado por Casagrande (1991), as folhas foram numeradas pelo sistema de Kuijper (Figura 2). As coletas das folhas ocorreram uma semana anterior a colheita. Como existem divergências na literatura de qual folha usar (folha diagnóstico), a avaliação foi definida pela amostragem de cem plantas por talhão, coletando 100 folhas +1 (Raij e Cantarella, 1997), como também, 100 folhas +3 (Malavolta, 1992).

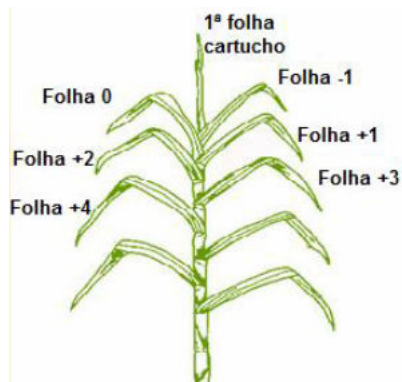


Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper (Casagrande, 1991).

No procedimento de coleta, dividiu-se a folha em três partes, cortando a parte central com aproximadamente 0,30 m. As folhas foram identificadas, separadas em sacos plásticos e acondicionadas em câmaras úmidas com temperaturas reduzidas para evitar-se a degradação das mesmas antes de serem encaminhadas ao laboratório e armazenadas no refrigerador até o momento das leituras (Tisot, 2009; Brandelero et al., 2012; Silva et al., 2012).

#### 4.2.3. Obtenção dos dados radiométricos em laboratório (Espectrorradiometria)

A leitura espectral foi realizada num total de 360 folhas (180 folhas +1 e 180 folhas +3). Estas foram, uma a uma, dispostas sobre um cubo de madeira (0,15 m de altura x 0,20 m de lado) utilizado como base, revestido em preto fosco. Uma manta de borracha, também preta e fosca, foi usada sobre as folhas, com abertura de 0,10 m de lado, para deixá-las totalmente abertas. Em cada folha foram coletados quatro espectros, e para a análise estatística, estabeleceu-se a leitura média das quatro medidas espectrais.

Para obtenção dos dados radiométricos das folhas da cultura da cana-de-açúcar em laboratório, foi utilizada a metodologia estabelecida por Abdel-Rahman et al (2008).

Em ambiente devidamente preparado (Figura 3), foram realizadas as leituras a partir do espectrorradiômetro FieldSpec 3 JR, marca ASD, o qual realiza medidas espectrais na faixa de 350 nm a 2500 nm. O intervalo de amostragem é de 1,4 nm na faixa de 350 nm a 1050 nm e de 2 nm na faixa de 1000 nm a 2500 nm. Sua resolução espectral é de 3 nm na faixa espectral de 350 nm a 700 nm e de 30 nm na faixa de 1400 nm a 2100 nm. O equipamento foi programado para realizar 50 leituras por amostra, gerando a curva espectral média de cada amostra de folha analisada.



Figura 3. FieldSpec 3 JR em ambiente de trabalho.

A geometria de aquisição dos dados, conforme definido por Nanni e Demattê (2006), utilizou uma placa padrão branca com 100% de reflectância. O leitor de fibra óptica foi colocado em posição vertical de 0,08 m de distância da plataforma de apoio para amostras. A área de leitura foi de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>. A fonte de iluminação utilizada foi composta por um spot marca Mako, contendo cooler para resfriamento do sistema e fixado em tripé apropriado, e, lâmpada halógena de 650 W para iluminação das amostras, com feixe não colimado para o plano visado, posicionada a 0,35 m da plataforma e com um ângulo de 30° em relação ao plano horizontal.

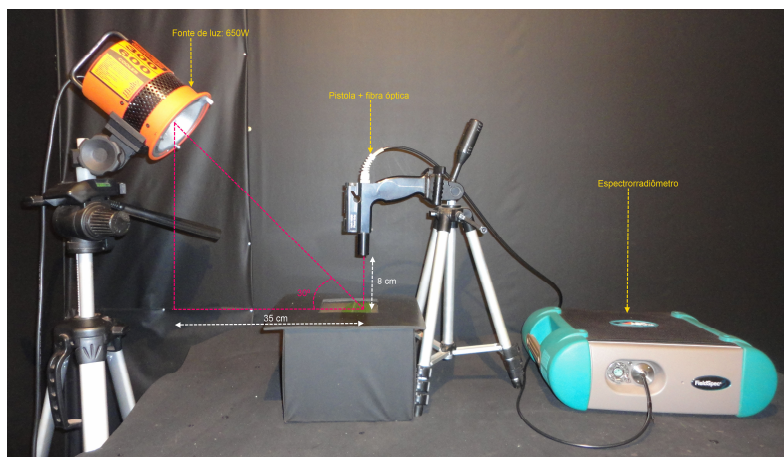


Figura 4. Geometria utilizada na aquisição dos dados de laboratório.

Assim, foi obtido o fator de reflectância bidirecional espectral, que expressa a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de um corpo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, sob as mesmas condições de iluminação e geometria de leitura (Nicodemus et al., 1977).

Para cada folha amostrada, foram realizadas quatro leituras ao longo da mesma. A resposta espectral de cada amostra, utilizada para a análise estatística e discussões deste trabalho, refere-se à média das quatro leituras, assim como realizado por Nanni (2000), Fiorio et al. (2010) e Cezar (2012).

#### 4.2.4. Análise estatística e algoritmo utilizado

Nesta fase, foi utilizado o programa Statistical Analysis System (SAS, 2001). A matriz de dados utilizada na análise estatística foi formada por 2150 comprimentos de onda do fator de reflectância, para as seis variedades de cana-de-açúcar.

A fim de estabelecer as variáveis preditoras que melhor separariam as variedades, foi utilizado inicialmente o procedimento STEPDISC do SAS ao nível de 5% de probabilidade para selecionar entre os 2150 comprimentos de onda, aqueles que fossem mais significativos para geração do modelo matemático. Dos 2150 comprimentos de onda extraídos das curvas espectrais, o sistema estabeleceu 116 (safra 2011/12) e 118 (safra 2012/13) para gerarem o modelo discriminante.

Após este procedimento, já com os comprimentos de onda selecionados, foi realizado o passo seguinte para diferenciação e caracterização das variedades estudadas. Nesta etapa, foi realizada a análise discriminante, com o objetivo de desenvolver e validar o método para determinação da variedade a partir de seus dados espectrais.

Neste procedimento, a variedade avaliada, é função de suas resposta espectrais, ou seja, das bandas selecionadas. Durante esta fase, foi utilizado o procedimento DISCRIM do SAS, o qual segundo Afifi et al. (2004) apud Nanni et al. (2004) possibilita, por meio do sistema computacional SAS/STAT, a obtenção de coeficientes das equações discriminantes.

Segundo Coleman e Tadesse (1995) a análise discriminante baseia-se em classificar uma observação em uma das várias populações, baseada em um vetor de variáveis para cada observação. A função da distância entre a observação e o centróide de cada população é calculada e cada observação é colocada na classe com qual ela tem a menor distância ao quadrado generalizada, assumindo que cada classe apresenta uma distribuição normal multivariada.

Subseqüente ao término das simulações foi gerado o relatório contendo as tabelas de contingência e porcentagem de acerto e erro para cada variedade. Além destes, fizeram parte do relatório, vários parâmetros estatísticos, os quais foram utilizados para validação da análise discriminante simulada.

#### 4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 5 (safra 2011/12) e 6 (safra 2012/13) mostram as curvas de reflectância das 12 variedades de cana-de-açúcar, no intervalo de 350 a 2500 nm.

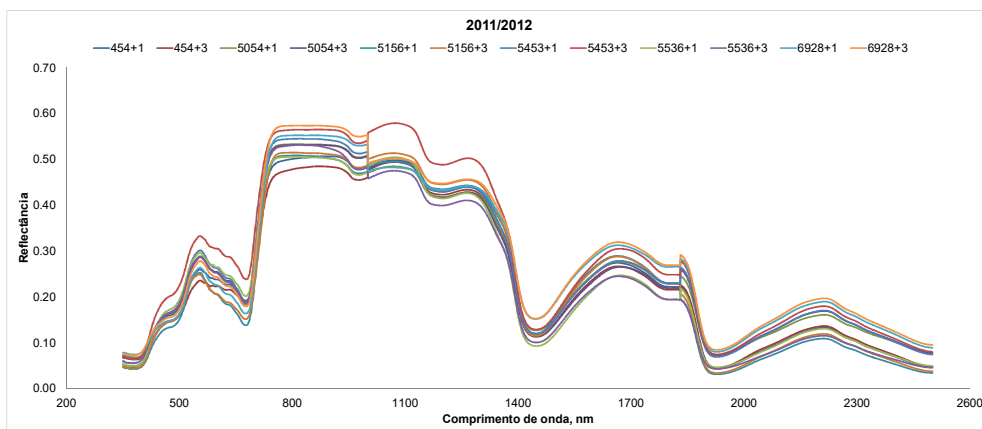


Figura 5. Média dos espectros de folha verde de cana-de-açúcar na safra 2011/12.

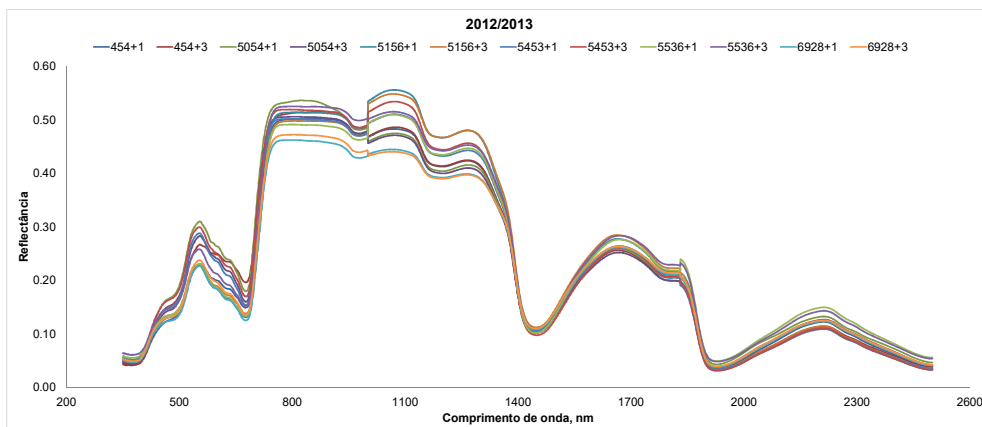


Figura 6. Média dos espectros de folha verde de cana-de-açúcar na safra 2012/13.

Observa-se nas Figuras 5 e 6, o comportamento espectral das folhas referentes as variedades estudadas. Igualmente aos resultados obtidos por Moreira (2005), no estudo da resposta espectral de folhas verdes, constatou-se que no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm (faixa do visível - VIS) a reflectância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (550nm). A queda da reflectância está

associada à absorção pelos pigmentos foliares, principalmente pela clorofila. Na região do azul, a absorção ocorre nas proximidades do comprimento de onda de 445 nm e está associada à presença dos pigmentos xantofila, carotenos, clorofilas  $\alpha$  e  $\beta$  na região do vermelho (V) apenas a clorofila atua, absorvendo energia em torno de 645 nm. Na faixa do infravermelho próximo (IVP), de 700 a 1300 nm, ocorre outro aumento na reflectância para valores próximos a 50%, devido à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células, e à quantidade de espaços intercelulares). Daí em diante, até 2500 nm (infravermelho médio - IVM), há um gradual decréscimo, na reflectância aparecendo algumas feições de absorção pelo conteúdo de água líquida.

Nota-se ainda nas Figuras 5 e 6, que pela análise visual das curvas espectrais adquiridas pelo espectrorradiômetro pode-se constatar que há uma diferenciação entre os tratamentos, tanto na safra 2011/12 quanto na safra 2012/13. Esta separabilidade ficou comprovada pela análise discriminante dos dados.

A partir da curva integral de reflectância obtida para as folhas das 12 variedades de cana-de-açúcar pelo espectrorradiômetro FieldSpec, 116 bandas foram selecionadas pelo STEPDISC do Statistical Analysis System (SAS, 2001) para safra 2011/12 e 118 bandas para safra 2012/13, cuja relação é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Relação dos comprimentos de onda utilizadas para análise discriminante das variedades de cana-de-açúcar, safras 2011/12 e 2012/13, selecionadas pelo procedimento STEPDISC do sistema SAS.

| Comprimentos de onda (nm) |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 2011/12                   |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
| 351                       | 395 | 445 | 495 | 633 | 802 | 904  | 979  | 2076 | 2424 |
| 359                       | 397 | 449 | 498 | 635 | 812 | 905  | 982  | 2081 | 2425 |
| 361                       | 402 | 451 | 504 | 693 | 824 | 912  | 984  | 2098 | 2428 |
| 362                       | 407 | 453 | 508 | 704 | 828 | 918  | 987  | 2151 | 2432 |
| 364                       | 410 | 458 | 516 | 709 | 839 | 931  | 990  | 2155 | 2460 |
| 366                       | 412 | 465 | 524 | 714 | 861 | 935  | 993  | 2165 | 2479 |
| 368                       | 413 | 469 | 538 | 750 | 862 | 946  | 995  | 2195 | 2480 |
| 370                       | 416 | 470 | 576 | 751 | 867 | 953  | 996  | 2376 | 2484 |
| 371                       | 419 | 472 | 587 | 756 | 868 | 965  | 1925 | 2389 |      |
| 376                       | 434 | 479 | 601 | 757 | 872 | 970  | 1932 | 2393 |      |
| 380                       | 436 | 485 | 608 | 758 | 879 | 971  | 2039 | 2401 |      |
| 385                       | 444 | 494 | 626 | 761 | 889 | 978  | 2070 | 2421 |      |
| 351                       | 395 | 445 | 495 | 633 | 802 | 904  | 979  | 2076 |      |
| 359                       | 397 | 449 | 498 | 635 | 812 | 905  | 982  | 2081 |      |
| 2012/13                   |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
| 364                       | 411 | 458 | 513 | 592 | 660 | 957  | 1065 | 2027 | 2306 |
| 365                       | 412 | 472 | 514 | 596 | 673 | 958  | 1833 | 2056 | 2371 |
| 371                       | 415 | 473 | 519 | 597 | 674 | 961  | 1904 | 2060 | 2382 |
| 381                       | 416 | 474 | 523 | 605 | 676 | 974  | 1907 | 2202 | 2384 |
| 382                       | 417 | 482 | 531 | 624 | 691 | 975  | 1911 | 2207 | 2405 |
| 385                       | 420 | 487 | 532 | 627 | 705 | 977  | 1946 | 2209 | 2423 |
| 390                       | 423 | 489 | 535 | 635 | 709 | 979  | 1955 | 2219 | 2435 |
| 396                       | 436 | 493 | 546 | 643 | 713 | 980  | 1983 | 2228 | 2441 |
| 398                       | 444 | 498 | 547 | 650 | 716 | 981  | 1986 | 2263 | 2483 |
| 400                       | 446 | 504 | 569 | 652 | 932 | 995  | 1990 | 2281 | 2500 |
| 403                       | 453 | 506 | 587 | 658 | 939 | 1052 | 1991 | 2289 |      |
| 404                       | 454 | 507 | 591 | 659 | 950 | 1056 | 1992 | 2296 |      |
| 364                       | 411 | 458 | 513 | 592 | 660 | 957  | 1065 | 2027 |      |
| 365                       | 412 | 472 | 514 | 596 | 673 | 958  | 1833 | 2056 |      |

Nas Tabela 2 (safra 2011/12) e 3 (safra 2012/13) são apresentadas as equações discriminantes para cada variedade, geradas pela análise de regressão com os dados de reflectância obtidas no sensor FieldSpec.

Tabela 2. Equações discriminantes para as variedades de cana-de-açúcar estudadas na safra 2011/12.

| Constante /<br>banda <sup>1</sup> | 454+1      | 454+3      | 5054+1     | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1     | 6928+3     |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                   | -468793    | -457020    | -526289    | -665283    | -574228    | -700291    | -602441    | -536387    | -307038    | -447879    | -568654    | -466627    |
| c2479                             | -39544098  | -19428674  | -56487333  | -50500796  | -54328108  | -36730994  | -83532871  | -70006235  | -20498826  | -41936942  | -33639787  | -44941065  |
| c693                              | 2464989    | 3545898    | -7568007   | -5388704   | 5581849    | 15789133   | -24039250  | -17220544  | 2360009    | 2988333    | 10184142   | 2725423    |
| c524                              | -8624105   | 29943811   | -79879647  | -49953397  | 43900280   | 49560493   | -43592453  | -57418361  | -3483949   | -5177532   | 62547562   | 33690314   |
| c416                              | -62342129  | -87413043  | -40494564  | -95674531  | -70541381  | -73867849  | -34671424  | -50133171  | -77417218  | -69991880  | -82826890  | -73491765  |
| c626                              | 34484276   | 11193226   | 45071779   | 38371749   | 152776537  | 149929037  | 80301818   | 83939472   | 45800677   | 86231096   | 61371717   | 54610787   |
| c361                              | 36766030   | 36656675   | 25268837   | 24932241   | 30488558   | 30016462   | 36517521   | 37514745   | 23196218   | 33338793   | 31535575   | 23942280   |
| c758                              | -210479667 | -203805889 | -183500742 | -158124059 | -91261097  | -107971564 | -243702792 | -220900942 | -140696197 | -188321360 | -135611795 | -98253607  |
| c436                              | -55791636  | -65117956  | -52499181  | -53904947  | -109478469 | -97080369  | -125027604 | -95160852  | -70587527  | -100665026 | -64365484  | -51198947  |
| c709                              | 49846972   | 8211444    | 95092851   | 93414310   | -24901742  | -39903362  | 67843204   | 65250337   | 46279391   | 47706989   | 14844519   | 33804987   |
| c407                              | -22818925  | -9396494   | -18982070  | 10974173   | -22296356  | -28952746  | -18032553  | -6065760   | 5139853    | -19938750  | -8875131   | -5369753   |
| c970                              | 7619108    | 26575919   | -47425414  | -93472447  | 5202605    | 69636729   | -10521076  | -31568116  | -25194210  | -10425629  | 38617911   | -18765556  |
| c479                              | -3824453   | 45729018   | -46238466  | -11002138  | 63431887   | 76914897   | -59064338  | -22224981  | 20324630   | 22566038   | 14504376   | -3626172   |
| c504                              | 31777789   | 9299156    | -2328700   | -76720938  | -83449487  | -71323978  | -59327386  | -54341889  | -56198322  | -31301469  | -38216760  | -44999393  |
| c508                              | -51261404  | -77282761  | 19331042   | 3273877    | 64080236   | 38085739   | 68307692   | 58028374   | -8389999   | 8262206    | -36959302  | -15974577  |
| c538                              | 19830118   | -5952605   | 64918659   | 50835033   | 2556305    | -4205194   | 48891737   | 57551156   | 18485441   | 26153811   | -20692221  | -2632799   |
| c587                              | 13731208   | 20140622   | 8979913    | 10859027   | -25677709  | -26015394  | -9487337   | -18137741  | 12972895   | 10906721   | 709491     | 1522136    |
| c458                              | -220773199 | -211618463 | -165375565 | -189790119 | -223697895 | -285717043 | -136797938 | -159870786 | -144378146 | -210517326 | -235399224 | -193474981 |
| c364                              | 12554764   | 12398880   | 8938382    | 21526568   | 26266103   | 25273148   | 36080046   | 27110693   | 14711329   | 12118983   | 35138698   | 30651148   |
| c904                              | -30786487  | -3583703   | -307343    | 13991222   | -205640204 | -223206579 | -91675603  | -98458491  | 18169415   | -36834727  | -135725325 | -101780523 |
| c867                              | 58016407   | 101942328  | 32731580   | 137212501  | 55129711   | 54913517   | 45606955   | 114966371  | 6144951    | -17072340  | 72963459   | 103657638  |
| c935                              | -192107412 | -162520271 | -195356841 | -229107799 | -85394684  | -98295387  | -159048145 | -151425528 | -127684353 | -156552144 | -178457420 | -182479661 |
| c839                              | -23308598  | -30970016  | 29509165   | 10020710   | 35199201   | 3591506    | 46989545   | 33682553   | 46265933   | 58812048   | -62688839  | -46514616  |
| c990                              | 80451759   | 50189731   | 130002690  | 165385870  | 131925107  | 115333135  | 163703243  | 157167013  | 83606839   | 102009318  | 99766250   | 120851815  |
| c410                              | 14324308   | -16282563  | 52859051   | 14779980   | -71138343  | -70018246  | -43890110  | -40459253  | -17022787  | -5347560   | -53841038  | -26044235  |
| c872                              | -42267997  | -44410229  | -128328151 | -177129549 | 123006076  | 100525868  | -32099813  | -85593416  | -98736792  | -46075653  | 55765896   | 28555192   |
| c412                              | 85986160   | 98942275   | 32834264   | 48793895   | 83152067   | 123728510  | 38656361   | 57771422   | 57342315   | 71887965   | 112303897  | 71449143   |

Tabela 2, Cont.

|       | 454+1     | 454+3      | 5054+1    | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3    | 5536+1    | 5536+3     | 6928+1     | 6928+3     |
|-------|-----------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| c419  | 9961551   | 28813369   | -4834499  | 7981955    | 19854762   | 37171006   | 20234775   | -18838825 | 18525893  | 15712112   | 49354141   | 37002198   |
| c385  | 9548276   | 26497218   | -15602971 | -21490890  | 33378397   | 47291089   | -5593174   | -2744826  | 968770    | 15237119   | 11625641   | -3915093   |
| c714  | -54670487 | -31169387  | -79984244 | -80055571  | -14650524  | -10846620  | -73631234  | -65207500 | -44820814 | -54387591  | -35471809  | -43775584  |
| c395  | -37977430 | -42357985  | -35174350 | -51720418  | -49874233  | -51043157  | -53336376  | -57707376 | -40852971 | -46999036  | -43293157  | -36693542  |
| c366  | 18163233  | 16964730   | 21971562  | 13611753   | -13167388  | -3901805   | -29500     | 2752186   | 3095398   | 8170619    | -2799511   | -304991    |
| c370  | 25361067  | 38410191   | 15506323  | 34754673   | 41232235   | 61643881   | 15328375   | 21250985  | 33214209  | 34029391   | 38633450   | 27101241   |
| c359  | -13285328 | -7263216   | -19636720 | -13252415  | -3104308   | -1427415   | -15614878  | -15313220 | -889083   | -8041807   | -548463    | -5691336   |
| c397  | -42769481 | -41932020  | -32955281 | -38541398  | -60294450  | -71473557  | -53487679  | -50965601 | -30956328 | -43593662  | -54686411  | -43530038  |
| c971  | -87941037 | -75069407  | -89460210 | -72824068  | -125579849 | -196949670 | -109961979 | -90609022 | -70774486 | -106932712 | -127838943 | -86683140  |
| c979  | 2137511   | 51919604   | 8466724   | 63524072   | 5455584    | -3250182   | 35534772   | 34731509  | 45915459  | 23440111   | -11429052  | 795608     |
| c469  | 144993778 | 143223538  | 136625214 | 169792209  | 186044873  | 217547617  | 183262888  | 127074600 | 143659696 | 173700927  | 209544801  | 183342885  |
| c444  | 25390099  | 18757905   | 16772190  | -22092031  | 9315869    | 31332552   | 11841324   | 6219270   | -12300198 | 10129873   | 2086305    | -10058434  |
| c978  | 6431881   | -4169972   | -46018341 | -62725545  | 52445107   | 59151500   | -10475314  | -17546099 | 6648062   | 20402132   | 57600912   | 13641731   |
| c2432 | 305835855 | 305924469  | 257398515 | 289631941  | 266729104  | 254363626  | 382626487  | 333576303 | 179348210 | 259211099  | 300930336  | 286894804  |
| c371  | -3720983  | -15722678  | 15874583  | 15649909   | -24998118  | -43999049  | 24582759   | 9626953   | -6660565  | -14173140  | -7901233   | 7963051    |
| c494  | 41336420  | 30175249   | 64959113  | 94075896   | 110593309  | 108501955  | 146889647  | 123242398 | 22565779  | 31696324   | 90292438   | 103675733  |
| c413  | 11799819  | 10139315   | 30086927  | 55913049   | 53580341   | 3663844    | 81708263   | 87441803  | 38998106  | 38144689   | 1033013    | 17783409   |
| c376  | -35955220 | -43943037  | -21837425 | -29689579  | -44934338  | -46605133  | -51100519  | -40854930 | -24787865 | -32647454  | -46358849  | -38332387  |
| c912  | -51425015 | -89363688  | -46189330 | -117106232 | -48857692  | -29026839  | -102901489 | -81004496 | -74274483 | -59945997  | -71991975  | -83503073  |
| c2484 | 60930031  | 45684057   | 78201058  | 66685762   | 60028681   | 63123407   | 89332058   | 67438365  | 25356998  | 52333456   | 54350359   | 62177387   |
| c946  | 73204835  | 48582481   | 71848703  | 124439489  | 911440     | -165377    | 83154771   | 66410177  | 65474472  | 35374795   | 129505017  | 124050042  |
| c351  | -15680106 | -16189639  | -15125084 | -21500823  | -11226641  | -9828891   | -19843757  | -17809604 | -14189632 | -14131282  | -16149765  | -15862956  |
| c987  | -85134938 | -129902717 | -59690918 | -112718071 | -102965633 | -117285244 | -60744295  | -64039477 | -89866776 | -95093770  | -92510419  | -82888302  |
| c995  | 1939039   | 9794376    | -8111665  | 2092177    | 1763758    | 2248605    | 12689558   | -10947167 | -808202   | -7746750   | 19533371   | 18697879   |
| c905  | -52746146 | -71304148  | 19239498  | -34851276  | -158148327 | -171040524 | 21656711   | 26344960  | -75083984 | -85138458  | -143059075 | -107131556 |
| c993  | 17295633  | 9883552    | 34906117  | 41690874   | 7433911    | -1209608   | -36406064  | -6660184  | 12232002  | 19970216   | -20026501  | 2555761    |
| c750  | 68919405  | 110098069  | -4140315  | -18558271  | 59279917   | 84593829   | 90997653   | 19783850  | 30284388  | 49662443   | 96839293   | 50573269   |

Tabela 2, Cont.

|       | 454+1      | 454+3      | 5054+1     | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1     | 6928+3     |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| c465  | -44816468  | -7662794   | -53436365  | -13182807  | -121555890 | -110272045 | -99824071  | -87499281  | -9238836   | -65097452  | -38109048  | -39588477  |
| c931  | 33990406   | 94422238   | -18090115  | 47871226   | 119642354  | 119078506  | 25236494   | 71115236   | 46820952   | 57480919   | 58671502   | 46186189   |
| c868  | -8257911   | -117565783 | 147830611  | 159128718  | 55320060   | 59327653   | 120552059  | 79452238   | 60581923   | 56846891   | 68826772   | 109835933  |
| c879  | -217077208 | -193335381 | -228729044 | -277026830 | -143270670 | -159272836 | -264922799 | -191349778 | -173039599 | -190466971 | -256710480 | -251080022 |
| c996  | -43342882  | -47080281  | -27148349  | -57287663  | -91299726  | -83437812  | -74358578  | -73259016  | -46668442  | -55466343  | -76076272  | -67390679  |
| c362  | 14279300   | 14233218   | 11895137   | 14845531   | 16033828   | 13724552   | 15705170   | 17331978   | 8980135    | 14769727   | 11854110   | 12091146   |
| c918  | 243033658  | 203980605  | 240893661  | 296172665  | 350946530  | 356028692  | 299506880  | 260575014  | 225531037  | 295943920  | 319284694  | 297363775  |
| c2428 | -55772203  | -88157104  | 6496177    | -38584886  | -125663379 | -148104025 | -23346546  | 11746493   | -34288335  | -55844067  | -130548968 | -112929416 |
| c889  | 1628617    | 47645328   | -81662809  | -87260182  | -109009341 | -100668287 | -53109415  | -119167939 | -31703744  | -53204298  | 28995262   | -4576304   |
| c498  | -64335966  | -22577708  | -65660441  | -57471040  | -164205615 | -179989990 | -145635966 | -136444883 | -20563065  | -55487227  | -128891158 | -109743906 |
| c2389 | -73250401  | -69416076  | -41671423  | -82955624  | -124227797 | -113103701 | -110176426 | -153841845 | -126533351 | -118397262 | -104786172 | -53501531  |
| c402  | 24583452   | 33142257   | 9268804    | 21387660   | 57470847   | 62783295   | 50597066   | 47550661   | 25500478   | 32222144   | 44530755   | 30519936   |
| c434  | 3473322    | 20784703   | -16786838  | 33807735   | 132007769  | 121237859  | 41137861   | 50842786   | 52184193   | 56244443   | 83068781   | 65809950   |
| c2081 | -47382504  | -32997566  | -101209226 | -110892596 | -29795361  | -41033060  | -121013985 | -135857070 | -53412889  | -49346685  | -22811495  | -30524950  |
| c761  | 66703054   | 59694850   | 100236625  | 105457206  | 24857127   | 49175907   | 106216400  | 70265968   | 110692201  | 108514325  | 44832964   | 32609906   |
| c757  | 108911158  | 100660556  | 82038712   | 85428897   | 61131852   | 71910550   | 27898694   | 86568310   | -13519668  | 20818405   | 61425463   | 79449725   |
| c576  | 5252029    | 9851796    | -1074340   | 3596501    | 4152560    | 8441347    | -1612352   | -1042226   | 833930     | 458109     | 9502338    | 7164522    |
| c472  | 17887192   | -70355713  | 115436225  | 28959678   | -109347217 | -105787248 | 80137003   | 49498977   | -54572438  | -36845858  | -51014572  | -7626021   |
| c633  | -106947021 | -66683784  | -141732953 | -131708251 | -230662184 | -231500992 | -166565839 | -170223988 | -92435716  | -153953898 | -110230127 | -112657669 |
| c470  | 556530     | 28513880   | -103954572 | -78291055  | 142444503  | 129398663  | -33851363  | -9128665   | 16261964   | 35858611   | 68196028   | 12795783   |
| c861  | 109227521  | 102794245  | 129453921  | 141118877  | 17025743   | 57029455   | 63925905   | 60782214   | 80758427   | 89305963   | 79662880   | 83192776   |
| c2098 | 55865030   | 58797217   | 30844458   | 65477114   | 4129612    | 46308024   | 49422364   | 81299942   | 52432858   | 30128790   | 80673375   | 43381214   |
| c2445 | -26625985  | 5362969    | -53489204  | -46731212  | -6971471   | 15677105   | -64086540  | -83304538  | -11863008  | -10427377  | -5945970   | -16243776  |
| c2424 | -224713997 | -228426155 | -190919581 | -242822838 | -245117617 | -274571766 | -258578356 | -244216653 | -148379847 | -196455758 | -265580404 | -242958497 |
| c756  | -121619449 | -124971563 | -134314780 | -146429943 | -48288501  | -71342400  | -70450839  | -61646741  | -54322934  | -78533925  | -72158881  | -97846080  |
| c449  | 40242260   | 51425775   | 56644677   | 48850725   | -14216211  | -50853794  | 15347804   | 39635068   | 26137859   | 46309089   | -78146516  | -43730725  |
| c953  | 72906121   | 34654578   | 103463089  | 69874069   | 3206590    | 31574014   | 37947023   | 39131513   | 27106610   | 51188107   | 21237978   | 27543991   |

Tabela 2, Cont.

|       | 454+1      | 454+3      | 5054+1     | 5054+3    | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1     | 6928+3     |
|-------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| c2070 | 11178830   | 22437266   | -13488178  | 21492082  | 4851605    | -15681026  | 69240403   | 79155541   | 13548576   | -8851054   | 48173350   | 34809733   |
| c2393 | 3559732    | 30571731   | -45060293  | 28554133  | 128559047  | 122430975  | 40975273   | 80693708   | 78665551   | 51335693   | 77330915   | 32065756   |
| c2076 | 47990523   | 33290184   | 114418295  | 68209089  | 31486537   | 56909555   | 39999973   | 15444217   | 20687565   | 63829294   | -27790799  | 2612581    |
| c601  | -9673513   | -28650402  | 19605108   | -6898645  | -50565027  | -74798129  | 38085908   | 10504007   | -44379803  | -43032445  | -22314526  | 3649404    |
| c608  | -33262153  | -10613309  | -67224828  | -41573534 | 48524921   | 81230042   | -79084567  | -39869613  | 20632321   | 10437640   | -551131    | -36494082  |
| c2421 | -51639760  | -32791526  | -111271042 | -80820883 | 101270703  | 96665629   | -26790380  | -15833091  | -15422436  | -20925933  | 49022948   | 16041980   |
| c2425 | 116694936  | 70799316   | 174680231  | 180984599 | 21725842   | 53306600   | 70206778   | 75401282   | 90491868   | 100337576  | 77186317   | 93426262   |
| c380  | -20226049  | -26015971  | -12800133  | -19646881 | -9378172   | -21264643  | -6163755   | -6784144   | -18875073  | -18615517  | -22917541  | -15331641  |
| c982  | 88342802   | 120170818  | 46938210   | 82991656  | 171976010  | 232825063  | 38104643   | 58155001   | 95679859   | 124889176  | 127815174  | 88827387   |
| c1925 | 7789357    | -16457146  | -29322907  | -45103036 | -21393765  | 3574291    | -65897771  | -38072085  | -28342676  | -33103584  | 12784805   | -10419496  |
| c1932 | -12088106  | 13085024   | 26599892   | 40823034  | 3853384    | -18357341  | 51695842   | 20449811   | 26119804   | 28029103   | -21490191  | 2537029    |
| c862  | 113349981  | 126096864  | 48714773   | 31031235  | 39795573   | 57928095   | 77219857   | 77610321   | 57719477   | 76990266   | 78203118   | 31736115   |
| c368  | 6773232    | -1655073   | 17695025   | 19704941  | 12314839   | 9327337    | 20604954   | 14200701   | 9553538    | 9559173    | 14285154   | 17650155   |
| c2480 | -14564620  | -20886733  | -38179456  | -40894477 | 8448188    | 7149277    | -13021138  | -9808365   | -26182394  | -28052024  | 15200475   | 1899100    |
| c635  | 78596839   | 58596466   | 109401487  | 107480379 | 82513158   | 63782194   | 136143889  | 122872432  | 45525493   | 68149444   | 53660850   | 74107915   |
| c495  | 76096629   | 74981607   | 61483490   | 88325723  | 93456751   | 95905153   | 74107735   | 90457831   | 66012429   | 83440091   | 85200183   | 72637363   |
| c451  | 112857979  | 124341018  | 67223309   | 81501902  | 165872613  | 228198951  | 58753135   | 79886852   | 95189505   | 138573934  | 136551715  | 89419405   |
| c828  | 19300109   | 13381066   | -35640696  | -26271065 | 39900183   | 51055664   | -15718056  | 284319     | 20370081   | 17261586   | 56657262   | 14320103   |
| c2460 | -55129942  | -56591057  | -30997445  | -29113471 | -51793801  | -72204940  | -56057800  | -35704361  | -17171784  | -32524294  | -81781825  | -63109280  |
| c453  | -48576054  | -64527172  | -28494912  | -45623746 | -110075662 | -140289245 | -9849955   | -34785888  | -66014457  | -85365501  | -51829901  | -27426876  |
| c984  | -10654762  | 7053878    | -29432362  | -30303078 | -25439951  | -10796173  | -1267087   | 1361759    | -33357164  | -42958108  | 2612640    | -9712822   |
| c802  | -1536339   | -914364    | -31899110  | -54965964 | -12722453  | -199105    | -4471530   | -32001105  | -39937719  | -38283494  | 20957340   | 4427331    |
| c824  | -162679445 | -124053465 | -122579479 | -92425704 | -88340438  | -127387975 | -131116980 | -125453605 | -49466613  | -97155575  | -160170382 | -129346515 |
| c965  | -38815450  | -60944931  | 19510762   | -548566   | -51864707  | -104529394 | 4524420    | -9817243   | -21935380  | -17462469  | -77230038  | -32220779  |
| c2151 | 21407285   | 38371303   | -13476001  | -9225541  | 30398699   | 33964100   | -72540755  | -36680457  | 62835470   | 69021489   | -15792361  | -39665651  |
| c2155 | -125689560 | -142536461 | -55563163  | -79282819 | -57911481  | -75016107  | -16054296  | -45998451  | -118821402 | -139727329 | -103177472 | -59081542  |
| c704  | 7331458    | 20788881   | -1806877   | -3623583  | 38299111   | 49446641   | 9678618    | 5942779    | -1067975   | 9366813    | 13416282   | 8621182    |

Tabela 2, Cont.

|       | 454+1     | 454+3     | 5054+1    | 5054+3    | 5156+1    | 5156+3    | 5453+1    | 5453+3    | 5536+1    | 5536+3    | 6928+1    | 6928+3    |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| c2165 | 37384014  | 30903257  | 35851294  | 39272362  | 14570615  | -28823147 | 64216641  | 44138431  | 26881807  | 44243608  | 31147977  | 44935761  |
| c2401 | 12733757  | 34136602  | 32555785  | 46421433  | 83815917  | 104073871 | 48744064  | 63897556  | 16202514  | 32494729  | 17154544  | 20495936  |
| c516  | -7777415  | -2689480  | -15200607 | -2462293  | -31213220 | -12003089 | -28025668 | -12001936 | -3118443  | -25147965 | -6409781  | -14838564 |
| c2376 | 23850984  | 5874145   | 5185813   | -6363354  | -54305650 | -71590859 | -1167280  | -21516793 | 2011071   | -2208171  | 23486883  | 18155515  |
| c751  | 64456689  | 25633146  | 130086203 | 126166112 | -10036409 | -34180060 | 66765761  | 87786401  | 57096052  | 74081310  | -9598592  | 27486683  |
| c2195 | 33695444  | 32630934  | 27209435  | 31854629  | 9895129   | 44637503  | 9857202   | 22960625  | 16176847  | 15896089  | 37325385  | 22596488  |
| c485  | -18739268 | -62460145 | 21148406  | 2899321   | -37309361 | -32400231 | -10053578 | -9542058  | -16367163 | -23737557 | -15754260 | -5801243  |
| c2039 | -13475084 | -21033764 | -10039937 | -20431223 | -4683967  | -11597007 | -9533673  | -11227955 | -12530850 | -11652024 | -15161008 | -12838562 |
| c812  | 151282641 | 148088744 | 148590144 | 152001808 | 45814221  | 74309233  | 115850268 | 133167516 | 75975931  | 109790376 | 101752007 | 102150289 |

<sup>1</sup>Bandas espectrais obtidas pelo sensor FieldSpec em laboratório e selecionadas pela análise Stepwise realizada no SAS.

Tabela 3. Equações discriminantes para as variedades de cana-de-açúcar estudadas na safra 2011/12.

| Constante/<br>banda <sup>1</sup> | 454+1      | 454+3      | 5054+1     | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3    | 6928+1     | 6928+3     |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|
|                                  | -2441737   | -2390677   | -1661727   | -1728511   | -1354352   | -1460207   | -1368299   | -1435748   | -1238279   | -1281112  | -2010998   | -1618495   |
| c1052                            | -33562101  | -13058866  | -31995114  | -6882090   | -68362746  | -77364851  | -100634689 | -95355751  | -53861830  | -38023488 | -60008109  | -58882901  |
| c1955                            | 778797159  | 639454941  | 266265641  | 385499443  | -208432328 | -152700894 | -295160042 | -245659865 | -117215840 | -98788018 | 908125293  | 571513458  |
| c364                             | 68247511   | 57416647   | 40139972   | 51797753   | 5487850    | 7630182    | 15396967   | 15861309   | 3661952    | 7113356   | 91126326   | 66644255   |
| c420                             | 68124498   | 40127529   | 79179950   | 64775710   | 85943741   | 82941083   | 74015351   | 89435675   | 134935307  | 115678169 | -12009980  | 16196515   |
| c532                             | -150375117 | -153027383 | -127552005 | -174927706 | -2444541   | -4682643   | -23582563  | -31805125  | -42848587  | -94217495 | -192949743 | -145070104 |
| c507                             | 25528037   | 60766221   | 120801144  | 107416301  | -37093961  | 2607140    | 18749797   | 17354775   | 23393116   | -10109812 | 54271505   | 69940622   |
| c716                             | 646743977  | 628570364  | 458308907  | 488575538  | 298970997  | 331454798  | 245957488  | 279885965  | 278628651  | 285452576 | 631875973  | 513617185  |
| c635                             | 226507273  | 175334993  | 76246551   | 105650092  | 140558250  | 133883655  | 105073342  | 136359593  | 170974405  | 182591462 | 179420189  | 158125510  |
| c411                             | 136745815  | 118358058  | 83299856   | 110870155  | -37390671  | -32947576  | -53992311  | -39113277  | -13935839  | -11377246 | 150252994  | 106565047  |
| c939                             | 753634093  | 704652693  | 510139435  | 568599438  | 114891988  | 161483163  | 98141495   | 127975279  | 109696401  | 113137299 | 838442831  | 629883444  |
| c412                             | 189256046  | 148700301  | 108486789  | 100983571  | 66122679   | 79570046   | 54909999   | 63698435   | 77172163   | 51632815  | 167775582  | 128671004  |
| c400                             | -9467594   | -2583985   | 6641503    | 14132676   | -5676994   | -8513631   | -6744914   | -5819793   | -7346520   | -7531723  | -7066205   | -3644859   |

Tabela 3, Cont.

|       | 454+1      | 454+3      | 5054+1     | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1     | 6928+3     |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| c385  | 135562634  | 125320679  | 84923217   | 87020553   | 43583329   | 51854878   | 36649652   | 44582087   | 44776561   | 45794921   | 135382991  | 108749534  |
| c596  | 616662762  | 559011986  | 475166946  | 473615836  | 53216887   | 94319199   | 112760306  | 133841488  | 71970547   | 56362050   | 705441704  | 535074789  |
| c587  | -71548066  | -102317037 | -108897575 | -124205635 | 13253171   | -3402751   | 37758402   | 24685137   | -4367296   | -560316    | -93937925  | -66252861  |
| c417  | -351011553 | -337454682 | -301997825 | -337850511 | -105743714 | -127646596 | -68219353  | -90801836  | -168915683 | -144972139 | -281219423 | -237746818 |
| c514  | 327153155  | 277884355  | 205827675  | 255031006  | 84056716   | 102472961  | 27953580   | 57361980   | 144014007  | 126339568  | 299300283  | 219670229  |
| c487  | -747824647 | -676888795 | -551882067 | -657994177 | 55291576   | 6547234    | 124358230  | 55703326   | -74986992  | -52273404  | -800850390 | -577362603 |
| c473  | -945696024 | -843472068 | -595684216 | -636015325 | -220690474 | -278731318 | -163822277 | -220277977 | -309399072 | -312256148 | -921175154 | -706620547 |
| c658  | -557738103 | -458360191 | -275543274 | -374089925 | 222318468  | 177152137  | 329353999  | 240511395  | 165747495  | 166018683  | -791872117 | -486681034 |
| c493  | 586605638  | 584962143  | 449992146  | 554564580  | 13235416   | 60632465   | -59441749  | -13518141  | 88958063   | 84295575   | 626768537  | 467300933  |
| c673  | -284357984 | -193911370 | -65665781  | -65389949  | 160169943  | 138747186  | 241379654  | 201918033  | 97665760   | 121324390  | -297746864 | -130669043 |
| c1904 | 584475589  | 604342496  | 368880900  | 401558830  | 122908944  | 169736543  | 92931614   | 134012721  | 145575034  | 244643785  | 673188838  | 506145981  |
| c519  | -135940641 | -183538779 | -150128528 | -224800863 | -13293679  | -18358650  | 9546398    | 2129461    | -60144266  | -96923525  | -119522745 | -97983580  |
| c660  | -653091572 | -656614662 | -512478823 | -567241102 | -335219551 | -392701891 | -331476115 | -330219314 | -377868078 | -336385425 | -552507097 | -517173452 |
| c1907 | -729382723 | -752992200 | -544204521 | -590459442 | -40711320  | -141052297 | -31356057  | -83218698  | -135956228 | -199909529 | -916900949 | -663095965 |
| c597  | -595876982 | -533998064 | -465902850 | -481845764 | -80840652  | -120747225 | -154441107 | -165506091 | -103799569 | -78002482  | -670536458 | -524416522 |
| c398  | -33488267  | -18640685  | 8701124    | -7752053   | 42902582   | 43692412   | 39458649   | 38914782   | 37548032   | 31190668   | -55626584  | -29906436  |
| c569  | 162741193  | 156094813  | 94036035   | 87970718   | 37014727   | 50429546   | 25951487   | 34933983   | 32618539   | 42369688   | 177257760  | 129831464  |
| c423  | 35907897   | 75594237   | 78416054   | 93912321   | -14644126  | 1516445    | 15389120   | 6031725    | -25643388  | -23473271  | 88375748   | 72464767   |
| c446  | -138596690 | -121402426 | -83580384  | -85740433  | 5432855    | -12115312  | -6084369   | -2116063   | 3864890    | 18648106   | -165099879 | -103509805 |
| c458  | 692035568  | 611361067  | 440239487  | 442223983  | 60068440   | 122325042  | -11775756  | 46567781   | 141267841  | 116125210  | 705565742  | 504284257  |
| c489  | -120895308 | -139246428 | -116050561 | -128363330 | -22885970  | -47713131  | -53019532  | -43089512  | -9681925   | -5255214   | -178401551 | -137505642 |
| c1992 | -609597692 | -552263723 | -421574193 | -313310376 | -509708591 | -513319239 | -516859316 | -565505862 | -423304267 | -461408276 | -565640784 | -511185485 |
| c1983 | 10336621   | -16172128  | 133935599  | 63108436   | 178696339  | 149468316  | 229520600  | 243693243  | 201507125  | 221023425  | -65829212  | -12806771  |
| c404  | 129307405  | 153239266  | 124160048  | 130426390  | 73846080   | 83161811   | 62795837   | 64816305   | 59680290   | 66363065   | 121391270  | 109104684  |
| c547  | 547164660  | 520502713  | 336023786  | 367619879  | 212388219  | 244654348  | 178219961  | 205710558  | 251738586  | 283054514  | 504891171  | 426567059  |
| c482  | 942395816  | 858733616  | 711345716  | 758985588  | 254497708  | 304396444  | 220439991  | 283344481  | 333283945  | 317413792  | 926004588  | 747570024  |
| c652  | -651028993 | -647509754 | -420970137 | -495351068 | -78510243  | -126327998 | 52745355   | 13046841   | -149961251 | -155238454 | -566062126 | -413243865 |

Tabela 3, Cont.

|       | 454+1      | 454+3      | 5054+1     | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1     | 6928+3     |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| c624  | 151002538  | 128115305  | 92362896   | 157462474  | -187147102 | -153223882 | -196444010 | -201635045 | -128442190 | -181369467 | 199628089  | 101846125  |
| c513  | 182391834  | 217359216  | 138503182  | 148396590  | 71170608   | 64497013   | 67403881   | 72758390   | 31336499   | 86867862   | 186406906  | 163350194  |
| c591  | -670655997 | -624067265 | -482890641 | -505024200 | -270443991 | -326513296 | -197399844 | -242977274 | -331209911 | -303753313 | -615039820 | -494970716 |
| c592  | 650664149  | 627922817  | 511616226  | 524082734  | 341310752  | 394684050  | 251292740  | 295901793  | 386785724  | 353476010  | 553975220  | 468321944  |
| c365  | -124302490 | -110348878 | -84075014  | -98413902  | -13765557  | -21506874  | -13481854  | -20193933  | -25838643  | -25974592  | -137639083 | -104486536 |
| c958  | -193507617 | -161099508 | -81307397  | -105869633 | 78477943   | 43118631   | 124243473  | 92807688   | 46460197   | 54741812   | -291676892 | -175449087 |
| c980  | 216754887  | 224535711  | 129938585  | 172151004  | 94743601   | 92948944   | 80420699   | 78804982   | 83124094   | 119039572  | 200934289  | 157161793  |
| c995  | 315030639  | 284470299  | 208687864  | 232465194  | 54676618   | 75039242   | 51561528   | 62999012   | 70827722   | 57198977   | 323031228  | 254054532  |
| c950  | -301471680 | -245526923 | -152834527 | -185544241 | -34296715  | -39157365  | -20214022  | -33417181  | -50669940  | -50651839  | -304236762 | -219229605 |
| c535  | 752440069  | 663250676  | 553802863  | 666475603  | -10436123  | 27606622   | -46337711  | 15368042   | 69121191   | 33006367   | 835018064  | 630099988  |
| c975  | -77373296  | -66157437  | -30352571  | -61437438  | 168624880  | 147765574  | 201648499  | 197347814  | 111659625  | 138209569  | -77588347  | -15680174  |
| c403  | -165470419 | -181293187 | -182626909 | -192424828 | -53182831  | -64369180  | -52535268  | -56848041  | -38345076  | -26953824  | -176425173 | -150443897 |
| c436  | 267428376  | 254016384  | 163519872  | 166565742  | 180720420  | 191168035  | 176233549  | 178291259  | 164696941  | 168623197  | 224731385  | 204117105  |
| c659  | 1121721496 | 1064125761 | 724487608  | 817992724  | 260300551  | 343157337  | 139163169  | 215800941  | 274242309  | 270282765  | 1203540131 | 919016992  |
| c472  | 551312130  | 508243668  | 465369913  | 491343514  | 151851196  | 188036070  | 159369252  | 188517968  | 176588126  | 137046362  | 576566677  | 467470917  |
| c932  | -654135335 | -617854558 | -472426824 | -512836365 | -142338993 | -190829104 | -132900589 | -161050978 | -151770954 | -141053108 | -710640691 | -552052845 |
| c979  | -154228125 | -117589566 | -80716657  | -98939520  | -47420082  | -47772325  | -31447450  | -42518556  | -80259491  | -75773201  | -118619798 | -91768452  |
| c650  | 659798495  | 615444961  | 451662309  | 499329191  | 62304235   | 112036684  | -33066683  | 22328809   | 141572329  | 111834292  | 628282147  | 462058028  |
| c957  | 995736501  | 894023358  | 729927029  | 792037074  | 205854076  | 298127966  | 158961185  | 235785646  | 336764841  | 269736252  | 1040286235 | 812296290  |
| c709  | -812485168 | -763472508 | -566123637 | -602162202 | -203533933 | -257302305 | -105477884 | -169543333 | -261273857 | -258800820 | -791189293 | -615753947 |
| c1911 | -442916025 | -437010962 | -281393440 | -304487240 | -301362892 | -284757068 | -253840832 | -277067668 | -251250793 | -309835951 | -346906809 | -329861686 |
| c415  | -408511757 | -361478593 | -246125531 | -249097384 | -135002961 | -159908072 | -83960177  | -116873930 | -158245497 | -147299567 | -378259288 | -292373672 |
| c546  | -655092865 | -570499824 | -413114222 | -455721482 | -319055703 | -314916285 | -270852739 | -303002816 | -329531192 | -331386489 | -524743088 | -467561868 |
| c371  | -109835549 | -105298422 | -79769391  | -80838444  | -50180137  | -55236304  | -42049441  | -48760207  | -48285416  | -49682360  | -103892351 | -87248489  |
| c545  | -308391420 | -324962398 | -219039630 | -222055143 | -4284622   | -60702896  | -931765    | -23176876  | -34537119  | -45553582  | -403971666 | -298728389 |
| c523  | -234339145 | -200747675 | -239929047 | -236177643 | -2265356   | -12501237  | 23213565   | -3367041   | -56337617  | -23578919  | -195036243 | -150543223 |

Tabela 3, Cont.

|       | 454+1       | 454+3       | 5054+1     | 5054+3     | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1      | 6928+3      |
|-------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| c381  | 200188085   | 194775449   | 154808246  | 172644792  | 38535365   | 51564008   | 22446979   | 33851139   | 44296873   | 41185766   | 207238606   | 161664301   |
| c531  | -308504527  | -243374435  | -133076058 | -166441881 | 35885315   | 10207700   | 80348017   | 51869692   | 47637787   | 102450481  | -372261016  | -263899070  |
| c1056 | -13685457   | -39166406   | 23402860   | -4332325   | 70125287   | 71034383   | 100689873  | 94454161   | 60055614   | 34634830   | -5840543    | 9638508     |
| c474  | 70040956    | 832170      | -112398982 | -70718564  | -132659786 | -118106666 | -100345331 | -120323507 | -84968832  | -82536051  | 128288877   | 35801577    |
| c416  | 399330284   | 364420268   | 264517299  | 297445686  | 67361117   | 92494668   | 6381342    | 36315250   | 104963355  | 91243828   | 378067665   | 275679643   |
| c961  | -284510407  | -307256163  | -348398638 | -350790767 | -168341907 | -191289745 | -151615507 | -181873458 | -206546099 | -194421708 | -253171997  | -240844392  |
| c2500 | -75757038   | -78617007   | -45763578  | -57997752  | 5565484    | 1068261    | -3035771   | -1642437   | 28938210   | 21270982   | -120579791  | -86759099   |
| c506  | 186167358   | 154484548   | 120273362  | 159731216  | 26561100   | 9896840    | -25601485  | -13667289  | 9959071    | 22267202   | 162274081   | 102220990   |
| c2202 | -933727241  | -871250689  | -619440107 | -746254757 | -104022215 | -155797906 | -91343643  | -129141567 | -113277760 | -121172363 | -1056540000 | -802943077  |
| c2441 | -122359672  | -115413172  | -162155326 | -134358167 | -43140622  | -54304289  | -15837362  | -39891052  | -87031074  | -69271079  | -77672280   | -65474847   |
| c2228 | -399297374  | -392262800  | -338686742 | -289578552 | -447701156 | -458936302 | -483651520 | -493749080 | -415728478 | -417543965 | -295029053  | -337533210  |
| c444  | -534606865  | -507314151  | -402769598 | -420120505 | -187988070 | -223466063 | -179735049 | -204813859 | -220309771 | -210138829 | -510171478  | -424178892  |
| c2056 | 1083804321  | 958733147   | 587054495  | 684482545  | 30899661   | 106979774  | -75372821  | -4770193   | 70358976   | 72272913   | 1227651317  | 856634028   |
| c676  | -362629921  | -350420687  | -272869005 | -356564124 | -104948825 | -138612472 | -135748002 | -146372612 | -201059353 | -205386906 | -351710601  | -322012279  |
| c2423 | -558287187  | -513633041  | -381361806 | -382208335 | -320171302 | -346845333 | -282620534 | -313615803 | -277979562 | -258808511 | -541919293  | -463967589  |
| c1990 | 712630262   | 618993751   | 480706872  | 430068886  | 334318090  | 378374693  | 170920890  | 255658091  | 375496348  | 309308466  | 581633483   | 454573485   |
| c2405 | -507508650  | -494174181  | -517970932 | -573920049 | -161425813 | -192243852 | -149850569 | -189953840 | -235597118 | -181172494 | -471655322  | -419771544  |
| c2382 | 967078485   | 882725514   | 689044171  | 766585400  | 196210068  | 255352399  | 148530474  | 211304662  | 243592612  | 186609401  | 992403663   | 791843004   |
| c498  | -1271470000 | -1187990000 | -892671142 | -977311225 | -355847698 | -430296502 | -296067688 | -364512153 | -383512781 | -367083609 | -1299750000 | -1040540000 |
| c1986 | 762236734   | 767791413   | 649934186  | 691176609  | 297189867  | 350997432  | 283206175  | 328456823  | 369372653  | 358100087  | 706751064   | 624983130   |
| c2435 | 458028597   | 456165820   | 430200822  | 383521264  | 309747068  | 343509326  | 251961221  | 297559051  | 351577770  | 324568093  | 341242601   | 325366403   |
| c977  | 120960753   | 118772988   | 123353234  | 113789508  | 64478278   | 76804758   | 33398768   | 45510065   | 95617975   | 82269320   | 67742018    | 58366747    |
| c1833 | 22618289    | 25338761    | 22795284   | 25165688   | 9127807    | 12452892   | 6527597    | 8157778    | 15644516   | 16617994   | 20423343    | 17406208    |
| c981  | -522830699  | -485413922  | -355002980 | -372542763 | -191056024 | -223482815 | -171225401 | -189875460 | -205816917 | -194951098 | -496012422  | -398856222  |
| c2060 | -966217391  | -885682249  | -656650383 | -695575270 | -279155355 | -339823194 | -183326436 | -258719614 | -288893148 | -272560918 | -1014450000 | -782350026  |
| c2483 | 85183946    | 74513198    | 71367183   | 80571268   | 33837362   | 33231529   | 39164989   | 44225868   | 24079448   | 20159137   | 99399127    | 82722612    |
| c2296 | 1278567103  | 1059547090  | 675842113  | 721289951  | 169793912  | 263119033  | 11718915   | 113487298  | 366683917  | 303907750  | 1195635557  | 849421022   |

Tabela 3, Cont.

|       | 454+1       | 454+3       | 5054+1      | 5054+3      | 5156+1     | 5156+3     | 5453+1     | 5453+3     | 5536+1     | 5536+3     | 6928+1      | 6928+3      |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| c2289 | 146972564   | 164718436   | 147472838   | 143245999   | 156168738  | 162527407  | 142865635  | 165307651  | 155510487  | 167093490  | 126356453   | 143913142   |
| c2384 | 61175930    | 45515690    | 33628262    | 98794060    | -164220847 | -152038168 | -139618277 | -146534897 | -131790944 | -133938384 | 149320189   | 70401275    |
| c974  | -247794999  | -257992169  | -206179646  | -217789315  | -209899298 | -216560929 | -249221508 | -243169920 | -171777794 | -189958548 | -252095719  | -244541941  |
| c2209 | -322871645  | -241821420  | -137238573  | -142592754  | 83724582   | 35167635   | 189433122  | 124418897  | -62735585  | -25303624  | -301612992  | -172963626  |
| c2263 | 1131749393  | 1048609241  | 727954002   | 814509939   | 165849559  | 251461308  | 90494273   | 154569694  | 229698097  | 217312464  | 1202475127  | 903014579   |
| c396  | -79013903   | -68331767   | -46048866   | -54535033   | -11691288  | -17588079  | -2168123   | -8529570   | -25463325  | -21694989  | -75115051   | -54635579   |
| c390  | 104860300   | 93825521    | 75740092    | 90253012    | -1568402   | 5424141    | -14592770  | -6483587   | 16360466   | 11401206   | 103813396   | 73889038    |
| c453  | -12680835   | 35095234    | 31257901    | 27637946    | 42530683   | 38724183   | 52078321   | 43007396   | -3965145   | 17993666   | -4946457    | 13646240    |
| c713  | -338196711  | -351908228  | -262274099  | -287652901  | -243443279 | -253391918 | -234990947 | -239571117 | -188048644 | -198813934 | -336572240  | -288112911  |
| c1991 | -136462006  | -45009121   | -24506161   | -118604929  | 294655229  | 271956991  | 343855795  | 307934462  | 134649381  | 190740084  | -169086586  | -53229729   |
| c674  | 846808334   | 731057931   | 481621288   | 603305848   | -34382063  | 36615494   | -92069392  | -34525727  | 161128872  | 131762899  | 843719041   | 607032503   |
| c382  | -193950139  | -190309609  | -142720987  | -162555966  | -33544928  | -45217252  | -16529519  | -26496141  | -32455101  | -32196345  | -205340878  | -156577154  |
| c2207 | 846946682   | 783803865   | 610200924   | 688050818   | 291440807  | 345235478  | 316606071  | 358753434  | 310475375  | 292967050  | 921911463   | 768917952   |
| c605  | 143051775   | 143668438   | 145491163   | 169020795   | 102059960  | 112401252  | 122691155  | 132133232  | 94775643   | 88575786   | 180372265   | 172395404   |
| c2027 | -507727031  | -485069733  | -333203913  | -377520049  | -23886660  | -61161644  | 39085356   | 16706534   | -75233470  | -82108690  | -494346629  | -345839301  |
| c2306 | 161530996   | 219538243   | 303650530   | 338296342   | 141616480  | 137108168  | 130837843  | 135597255  | 101787365  | 101942239  | 152092801   | 159097837   |
| c705  | 576340932   | 562192026   | 441473792   | 477961007   | 164330779  | 200660205  | 107589918  | 146435673  | 188232889  | 187995716  | 572862122   | 450842083   |
| c2219 | 447291455   | 391289560   | 271017835   | 260510461   | 102151652  | 128072643  | 23710471   | 70939674   | 167160100  | 154205328  | 365606899   | 270352205   |
| c643  | 93912748    | 105345557   | 36291178    | 78891735    | -117087203 | -101632186 | -130753612 | -142221302 | -117684184 | -99656908  | 143155296   | 73622770    |
| c504  | 269776359   | 251366583   | 175757406   | 188606181   | 76397220   | 95256777   | 55256807   | 73663817   | 84454661   | 82948568   | 277740999   | 221104507   |
| c2371 | -772486281  | -682676120  | -446814365  | -507654035  | -40574414  | -95565432  | 33791298   | -18478173  | -122676133 | -103070207 | -778572449  | -554998638  |
| c1946 | -482576834  | -370434353  | -223808951  | -245847636  | 59258072   | 25244963   | 146331800  | 99687197   | -58659566  | -23286502  | -432355416  | -267646535  |
| c627  | -500520441  | -442993852  | -285894977  | -347569261  | -80320756  | -109982241 | -76038924  | -96485265  | -75339924  | -57066223  | -567765590  | -434673321  |
| c1065 | 46644210    | 51975246    | 8746945     | 11182901    | 394662     | 8349800    | 2186579    | 3021436    | -4573649   | 5006450    | 64588280    | 48939243    |
| c691  | -189371213  | -177673110  | -138422054  | -152169196  | -31094639  | -41760199  | -6941623   | -20947077  | -47668793  | -43445371  | -179576559  | -132641703  |
| c2281 | -2022990000 | -1854400000 | -1374740000 | -1537320000 | -356691242 | -493540425 | -182418890 | -319117856 | -516520119 | -465157626 | -2061880000 | -1563810000 |

<sup>†</sup>Bandas espectrais obtidas pelo sensor FieldSpec em laboratório e selecionadas pela análise Stepwise realizada no SAS.

Verifica-se nas Tabelas 2 e 3 que as variedades de cana-de-açúcar estudadas apresentaram comportamento similar nas safras analisadas, uma pequena diferença ocorreu na safra 2012/12, ano mais seco, tendo as equações mais dois comprimentos de onda. Pela Análise Discriminante, foram selecionadas 117 (safra 2011/12) e 119 (safra 2012/13) componentes das equações de regressão com os dados de reflectância obtidas no sensor FieldSpec. Optou-se em apresentar parte de uma equação, como exemplo.

Assim, é apresentada a equação da variedade 454 e folha +1. A equação discriminante para esta variedade será:

$$454+1 = - 468793 - 39844098 * c2469 + 2464989 * c693 - 8624105 * c524 - 62342129 * c416 + 34484276 * c626 + 36766030 * c361 - 210479667 * c758 - 55791636 * c436 + 49846972 * c709 - 22818925 * c407 + 7619108 * c970 - 3824453 * c479 + 31777789 * c504 - 51261404 * c508 + 19830118 * c538 + 13731208 * c587 - 220773199 * c458 + 12554764 * c364 - 30786487 * c904 + 58016407 * c867 - 192107412 * c935 ...$$

Os valores de c351, c359, ..., c2500 correspondem aos comprimentos de onda selecionados para as variedades amostradas. Considerando-se agora, que tendo em mãos os dados de reflectância médios por comprimento de onda (como os selecionados neste trabalho) de uma destas variedades. Os dados de reflectância deverão ser aplicados em todas as equações das Tabelas 2 e 3. A variedade que obtiver o maior valor resultante da equação, terá maior probabilidade de ser a variedade desconhecida. Tal interpretação é válida para as variedades e as condições deste trabalho porém abre, como perspectiva, a possibilidade de caracterização de variedades de cana em diferentes regiões do país, auxiliando numa identificação preliminar mais rápida, conforme concluído por Demattê e Garcia (1999), Demattê (1999) e Nanni (2000), que aplicaram este conceito para solos.

Segundo Epiphanyo e Formaggio (1991), muita informação pode ser retirada a partir da análise de apenas uma banda espectral, porém a disponibilidade de várias bandas permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, ou seja, quanto maior o número de bandas espectrais dispuser um sistema sensor, mais possibilidades de extração de informações do objeto de estudo ele poderá abranger.

A Tabela 4 resume a porcentagem de acertos para a distinção das variedades aqui examinados através das equações discriminantes. É possível observar que todas as variedades obtiveram acerto de 100%, isto é, todas as amostras do 454+1, por exemplo, apresentaram

valores semelhantes, não tendo se confundido com nenhuma outra variedade. O mesmo comportamento ocorreu nas duas safras analisadas, por isso é apresentada uma vez apenas.

O erro global da classificação foi de 0,00% (Tabela 5), melhor que as variações encontradas Appan et al. (2004), Galvão et al. (2005), Fortes e Demattê (2006) e Johson (2008).

Tabela 4. Número de observações e porcentagem de classificação das variedades dentro de cada classe utilizando-se as 116 e 118 comprimentos de onda para todas as variedades da área de estudo.

| Var <sup>1</sup>   | 454+1               | 454+3  | 5054+1 | 5054+3 | 5156+1 | 5156+3 | 5453+1 | 5453+3 | 5536+1 | 5536+3 | 6928+1 | 6928+3 | Total <sup>2</sup> |
|--------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| 454+1              | 8 <sup>3</sup>      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 8                  |
|                    | 100,00 <sup>4</sup> | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 454+3              | 0                   | 8      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 8                  |
|                    | 0,00                | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5054+1             | 0                   | 0      | 9      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 9                  |
|                    | 0,00                | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5054+3             | 0                   | 0      | 0      | 9      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 9                  |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5156+1             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 14     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 14                 |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5156+3             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 14     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 14                 |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5453+1             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 9      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 9                  |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5453+3             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 9      | 0      | 0      | 0      | 0      | 9                  |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5536+1             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 12     | 0      | 0      | 0      | 12                 |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 5536+3             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 12     | 0      | 0      | 12                 |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 0,00   | 100,00             |
| 6928+1             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 8      | 0      | 8                  |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 0,00   | 100,00             |
| 6928+3             | 0                   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 8      | 8                  |
|                    | 0,00                | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 100,00 | 100,00             |
| Var                | 454+1               | 454+3  | 5054+1 | 5054+3 | 5156+1 | 5156+3 | 5453+1 | 5453+3 | 5536+1 | 5536+3 | 6928+1 | 6928+3 | Total <sup>7</sup> |
| Total <sup>5</sup> | 8                   | 8      | 9      | 9      | 14     | 14     | 9      | 9      | 12     | 12     | 8      | 8      | 120                |
| % <sup>6</sup>     | 6,67                | 6,67   | 7,50   | 7,50   | 11,67  | 11,67  | 7,50   | 7,50   | 10,00  | 10,00  | 6,67   | 6,67   | 100                |

<sup>1</sup>Variedades/folhas estudadas; <sup>2</sup>Total de observações de cada variedade; <sup>3</sup>Número de observações classificadas para a variedade; <sup>4</sup>% de erro ou acerto; <sup>5</sup>Total de observações classificadas em cada variedade; <sup>6</sup>% de observações em cada variedade em relação ao número total de observações; <sup>7</sup>Número total de observações.

Tabela 5. Contagem da estimativa do erro para cada variedade, sua porcentagem de participação em relação ao total e o erro total para a análise discriminante utilizando todas as variedades da área de estudo.

| Var               | 454+1  | 454+3  | 5054+1 | 5054+3 | 5156+1 | 5156+3 | 5453+1 | 5453+3 | 5536+1 | 5536+3 | 6928+1 | 6928+3 | Total <sup>1</sup> |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| Taxa <sup>2</sup> | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000             |
| p <sup>3</sup>    | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 | 0,0833 |                    |

<sup>1</sup>Valor total do erro na classificação utilizando a análise discriminante; <sup>2</sup>Taxa de erro para cada variedade; <sup>3</sup>Probabilidade de participarem, a priori, na própria variedade.

Os resultados apresentados na Tabela 4 da análise discriminante comprovaram a eficiência dos agrupamentos confirmando a expectativa até agora apresentada, com possibilidade do uso da reflectância das folhas de cana-de-açúcar para sua discriminação.

#### **4.6. CONCLUSÃO**

A resposta espectral das folhas verdes de cana-de-açúcar, analisada por meio do método multivariado de análise discriminante, demonstrou perfeitamente possível a diferenciação das seis variedades e das duas posições de folhas aqui estudadas.

#### 4.7. REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B.; Van Den Berg M. Imaging spectroscopy for estimating sugarcane leaf nitrogen concentration. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology. Neale, Christopher M. U.; Owe, Manfred; D'Urso, Guido (Eds). **Proceedings of the SPIE**, v. 7104, n. 12, pp. 71040-71040, 2008
- AFIFI, A.; CLARK, V. A.; MAY, S. **Computer-aided multivariate analysis**. Boca Raton: Chapman & Hall, 2004. 419p.
- ALMEIDA, T.I.R.; ROSSETO, R.; SOUZA FILHO, C.R. Imagens ASTER e LANDSAT ETM aplicadas à previsão de safra de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: discussão metodológica e primeiros resultados. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p. 488-492.
- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J., Detection of sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 25, p. 489-498. 2004.
- BARROSO, L. P.; ARTES, R. Análise multivariada. In: REUNIÃO ANUAL DA RBES E SEAGRO, 48., 2003, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2003. 155 p
- BRANDELERO, C; BERRA, E.F.; BACKES, K.S.; PEREIRA, R.S.; BRUN, E.J. Espectrorradiometria na região do visível e do infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 215-222, jan.-mar., 2012.
- CASAGRANDE, A. A. 1991. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 157p.
- CEZAR, E. **Avaliação das características químicas e do comportamento espectral da Torta de Filtro/Matéria Orgânica / Vinhaça por meio da espectrorradiometria difusa**. Maringá, UEM. 2012. 178p. Tese (Doutorado)
- COIMBRA, J.L.M.; SANTOS, J.C.P.; ALVES, M.A.; BARZOTTO, I. Técnicas multivariadas aplicadas ao estudo da fauna do solo: contrastes multivariados e análise canônica discriminante. **Revisra ceres** 54(313): 270-276, 2007.
- COLEMAN, T.L.; TADESSE, W. Differentiating soil physical properties from multiple band DOQ data. **Soil Science**, v.160, n.2. p.81-91, 1995.
- CRUZ, C.D.; CARNEIRO P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, UFV. 2003. 579p.
- DEMATTE, J. A. M. **Reflectância espectral de solos**. Piracicaba, Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 1999. 452p.
- DEMATTE, J.A.M.; GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.327-342, 1999.
- DEMATTE, J.A.M.; NANNI, M.R. Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, p.4715-4738, 2003.

EPIPHANIO, José Carlos Neves e FORMAGGIO, Antônio Roberto. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.10, p.1615-1624, 1991.

FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P., SILVA, P., CHAN, B. **Análise de Dados: Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões**. 1.ed. Rio de Janeiro: Campos. Elsevier, 2009. 544p.

FERRAZ, P. **Influência da geometria de iluminação e do ângulo de visada na resposta espectral da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Piracicaba, 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado).

FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R. Diferenciação espectral de solo utilizando dados obtidos em laboratórios e por sensor orbital. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.2, p.453-466, 2010.

FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; SPAROVEK, G. Cronologia e impacto ambiental o uso da terra na microbacia hidrográfica do Ceveiro, em Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 671-679, 2000.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J.A.M., Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. **International Journal of Remote Sensing**, 27, p. 395–1412. 2006.

GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A., Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, 94, p. 523–534. 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>> Acesso em: mar. 2010.

INAMASU, R.Y.; SOUSA, R.V.; PORTO, A.J.V.; FORTES, C.; LUCHIARI, A.; SCHEPERS, J.S.; SHANAHAN, J.F.; FRANCIS, D.D. Acesso ao estado nutricional da cana-de-açúcar por meio de sensor ativo de refletância. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Esalq/Usf, 2006. 8p.

JOAQUIM, A.C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara – SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. 1998. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).

JOHNSON, R.M.; R.P.; VEREMIS, J.C; RICHARD, E.P.; ZIMBA, P.V. Discrimination of sugarcane varieties with pigment profiles and high resolution, hyperspectral leaf reflectance data. **Journal Association Sugar Cane Technologists**: 28: p.63-75, 2008.

JOHNSON, R.M.; VIATOR, R.P.; VEREMIS, C.J.; RICHARD, E.P.; ZIMBA, P., Discrimination of sugarcane varieties with hyperspectral reflectance measurements and plant pigment analysis. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, 25, p. 111–112. 2005.

MALAVOLTA, E. ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: **Agrônômica Ceres**, 1992.124p.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320p.

NANNI, M. R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366p. Tese (Doutorado em Agronomia).

- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. FIORIO, P. R. Análise discriminante dos solos por meio de resposta espectral no nível terrestre. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.10, p.995-1006, 2004.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society American Journal**, v.70, p.393-407, 2006.
- NANNI, M. R.; OLIVEIRA, R.B. Levantamento pedológico detalhado das áreas de produção de cana industrial da cooperativa Cooperval. **Relatório Técnico**. 2009. 85p.
- NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, J. C.; HSIA, J. J.; GINSBERG, I. W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. U.S. Department of Commerce, 1977. 52p.
- PAMPLONA, V.M.S. **Índices de Qualidade do Solo para Plantação de Açaí**. Belém, 2011. 139p. Dissertação (Mestrado).
- PAPA, R. A. **Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectralradiometria, câmera digital e imagem ASTER**. Brasília, 2009. 132 p. Dissertação de Mestrado.
- RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H.; et al. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2: ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p. 233-239. (**Boletim técnico, 100**)
- RENCER, A.C. **Methods of multivariate Analysis**. 2.ed. New York, A Wiley-Interscience publication. 2002. 740p.
- SAS - INSTITUTE. **SAS**, software: user's guide. version 8.2, Cary, 2001.
- SILVA, E.M.; MARANGON, G.P.; Dessbesell, L.; Moraes, W.W.; Lippert, D.B.; Pereira, R.S. Caracterização espectral na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 285 - 292, abr./jun. 2012.
- TISOT, D. A. **Modelos de transferência radiativa no estudo da concentração de clorofila em cana-de-açúcar, utilizando dados hiperspectrais**. São José dos Campos: INPE, 2009. 112p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto).

## 5. CAPÍTULO 2

### **Colorimetria digital para discriminação de variedades de cana-de-açúcar em épocas distintas de colheita e sua relação com a produtividade**

## RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) destaca-se na agricultura brasileira, com grande importância econômica e social, e vem se expandindo mundialmente. Objetivou-se neste estudo a análise da variação das coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , do croma (C) e ângulo de matiz ( $h^\circ$ ) do sistema CIELAB (Comissão Internacional de Iluminantes), para discriminar seis diferentes variedades de cana-de-açúcar (RB 72454, RB 835054, RB 845156, RB 855453, RB 855536 e RB 966928), duas posições de folhas (+1 e +3), em quatro épocas de colheita do ano e correlacioná-las com a produtividade. Para a avaliação da cor utilizou-se um calorímetro triestímulo Minolta CR-400, no espaço de cores CIE Lab. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste estatístico de *Tukey*, considerando 95% de confiança. Os resultados obtidos utilizando a diferença de coloração das folhas evidenciaram que não foi possível discriminar variedades de cana-de-açúcar, épocas de colheita e posição de folha. A variedade RB 72454 foi a que mais apresentou diferença significativa, tanto para distinção entre as variedades quanto para posição de folha diagnóstica. A correlação dessas variáveis com a produtividade da cultura foi mínima, na maioria, inversa.

Palavras-chave: Colorimetria. Reflectância. Sensoriamento Remoto. Cor de folha.

## ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* sp.) is an important economic and social commodity for Brazil and has gained importance also worldwide. Therefore, this study aimed analyzing the chromatic coordinates variance  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , of chrome (C) and the angle hue ( $h^\circ$ ) of the CIELAB system (which is the acronym for Commission Internationale de l'Eclairage Lab) as to discriminate six different sugarcane varieties (RB 72454, RB 835054, RB 845156, RB 855453, RB 855536 e RB 966928), two leaf positions (+1 and +3), four harvest times in an year, and to establish a correlation of those parameters with productivity. The three-stimulate Minolta CR-400 colorimeter in the CIE Lab colors space was employed for color evaluation. Variance analysis was conducted for the obtained data in which the mean values were compared through the statistical *Tukey* test, considering 95% confidence. The data reflecting leaf coloration differences did not indicate evidences for discriminating sugarcane varieties, harvest time or leaf position. RB 72454 was the variety which presented the most significant difference in terms of variety discrimination and diagnose leaf position. Correlation of those variables to productivity was very low. In fact, unexpected behavior was identified for most of the varieties.

Keywords: Colorimetry, reflectance, remote sensing, leaf color.

## 5.1. INTRODUÇÃO

O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, China e Tailândia (Shikida, 2011). Os derivados de cana-de-açúcar representam 11% das exportações brasileiras, e a cana-de-açúcar é quarta cultura em extensão territorial (Funbio, 2010). Encontra-se entre as culturas mais tecnificadas e capacitadas no que diz respeito ao uso de ferramentas para seu gerenciamento. Nesse contexto, informações mais precisas e rápidas têm importância estratégica fundamental para o setor sucroalcooleiro. (Machado, 2003).

Com o avanço tecnológico, técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo utilizadas com a finalidade de permitir o monitoramento mais freqüente das condições de campo, sendo aplicadas aos estudos da superfície vegetada, ao mapeamento e à identificação das diferentes coberturas do solo, bem como para estimativas de produtividade (Matos et al., 2012).

A cor das folhas é uma propriedade passível de caracterização via sensoriamento-remoto. Pode ser definida como a sensação visualizada por um indivíduo quando a energia da luz refletida, correspondente ao espectro visível (comprimento de onda ( $\lambda$ ) entre 390nm a 750nm) atinge a retina do olho (Ribeiro, 2007).

A cor dos vegetais é devida a quatro principais grupos de pigmentos naturais: clorofilas, carotenóides, flavonóides e betalainas. As clorofilas são verdes; os carotenóides, amarelos, laranja ou vermelhos; as antocianinas são azuis ou vermelhas; as betalainas vermelhas ou amarelas (Kidmose et al., 2002).

Quando a análise da informação cromática é utilizada como um parâmetro de avaliação de um objeto, há necessidade do emprego de técnicas que minimizem as variações de um julgamento visual subjetivo. A colorimetria, conhecida como a ciência da medição da cor, é utilizada no comércio, indústria e laboratório para expressar a cor de forma numérica de acordo com padrões normalizados internacionalmente, tornando a comunicação da cor mais simples e exata (Wendt, 2006).

A cor é um atributo com largo espectro de uso na Ciência do Solo (Campos e Demattê, 2004), mas pouco explorado em plantas. Alguns exemplos são de Amarante (2009; 2010), que buscou quantificar o conteúdo de clorofilas em folhas de plantas jovens de videiras e milho respectivamente para correlaciona-las com a aplicação de nitrogênio.

Os métodos disponíveis para a medida da cor vão de uma simples comparação visual com um padrão, a sofisticados instrumentos denominados colorímetros e espectrofotômetros. O espectrofotômetro é um instrumento que fornece a análise espectral das propriedades de

reflectância e/ou transmitância de um objeto a cada comprimento de onda, e pode calcular indiretamente, as informações psicofísicas (colorimetria).

O colorímetro triestímulo é um instrumento que proporciona medições correlatas à percepção do olho humano através dos valores triestímulos (MacDougall, 2002). No colorímetro, a luz incidente é refletida num receptor que possui sensores para as cores vermelho, verde e azul, os quais funcionam a partir das funções  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ . Em seguida, o mesmo obtém a cor na notação desejada. Esses sensores repassam as cores recebidas para um processador que as transforma em números X, Y e Z (Minolta, 1998). A utilização de instrumentos para medição da cor tem a vantagem de eliminar o aspecto subjetivo da avaliação visual natural (Martinazzo et al., 2008), tornando as leituras mais precisas (Demattê et al., 2011).

Com o objetivo de normalizar a medição da cor, em 1931 a CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) adotou os seguintes métodos para medição e especificação de cor: uso de fontes de luz-padrão definidas pela CIE, condições exatas para observação ou medição da cor, uso de unidades matemáticas apropriadas para expressar a cor e definição do observador-padrão (Jiménez e Gutiérrez, 2001). Em 1976, a CIE recomendou o uso da escala de cor CIE  $L^*a^*b^*$  ou CIELAB. Este sistema é baseado em três elementos: a luminosidade ou claridade, a tonalidade ou matiz e a saturação ou cromaticidade (Hirschler, 2002).

A escala de cor CIELab pode ser usada em qualquer objeto cuja cor pode ser medida. É atualmente o sistema mais utilizado para descrição quantitativa da cor de um objeto devido a sua uniformidade (Martinazo, 2006).

Existem ainda valores de delta ( $\Delta$ ) associados a esta escala de cor ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ ) para indicar o quanto a amostra diferiu do padrão para  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  e são freqüentemente utilizados no controle de qualidade e ajustes de formulação, além de serem utilizados para o cálculo da diferença total de cor ( $\Delta E^*$ ) (HunterLab, 1996). O ângulo de matiz ( $h^\circ$ ) é o ângulo do círculo, derivado dos valores de  $a^*$  e  $b^*$ . E a saturação ou cromaticidade (C) é o desvio a partir do ponto correspondente ao cinza no eixo  $L^*$  (Barros, 2002).

O sistema  $L^* a^* b^*$  é utilizado por mais de 90% dos usuários de diversas áreas (Sánchez-Marañón et al., 1995).

Na literatura praticamente não há trabalhos utilizando o colorímetro digital na discriminação e correlacionando com alguma característica de produção de culturas agrícolas, é um método que ainda precisa ser investigado.

Assim, este trabalho foi conduzido visando avaliar a viabilidade da utilização do colorímetro digital para discriminar variedades de cana-de-açúcar, melhor posição de folhas diagnósticas e sua relação com a produtividade média do talhão, de forma não destrutiva.

## 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado na área de abrangência da Cooperativa Agroindustrial Vale do Ivaí LTDA - COOPerval, sediada no município de Jandaia do Sul - PR, cuja área plantada com cana é de 16.000 ha, num raio em torno de 60 km em relação ao complexo industrial. A Fazenda Santa Lúcia, no município de Bom Sucesso é, mais especificamente, onde a área experimental está situada (Figura 1), cujas coordenadas centrais são latitude  $23^{\circ}43'37''\text{S}$  e a longitude  $51^{\circ}46'54''$ . A altitude é de 542 m.

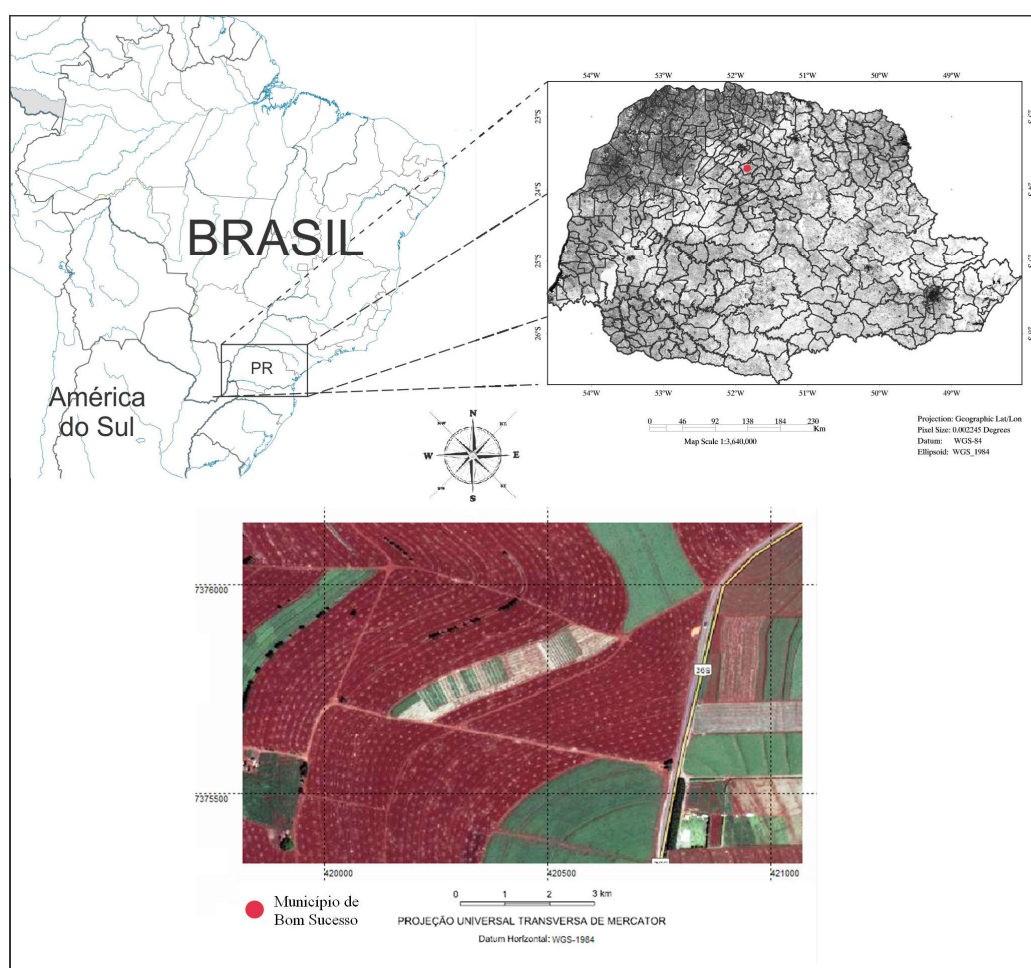


Figura 1. Área experimental na Fazenda Santa Lúcia.

O clima da região é o tropical de altitude, tipo Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, clima subtropical ou temperado úmido, sem estação seca e de verão longo e quente. Ocorrem de zero a três geadas noturnas por ano. A precipitação é superior a  $1.400 \text{ mm ano}^{-1}$ .

De acordo com Nanni e Oliveira (2009), o solo predominante na área foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico.

A área experimental foi composta por quatro épocas de colheita (março, junho, agosto e novembro), seis diferentes variedades de cana-de-açúcar (RB 72454, RB 835054, RB 845156, RB 855453, RB 855536 e RB 966928) e duas posições de folhas (+1 e +3) que foram repetidas e distribuídas, aleatoriamente, em 3 blocos, resultando num total de 72 parcelas (Figura 3a). Cada parcela era composta por 4 linhas, chamadas sulcos, de 6 m de comprimento e espaçadas em 1,40 m uma da outra (Figura 3b). As duas linhas externas são chamadas de borda e as duas centrais correspondem a área útil da parcela. O trabalho foi realizado em duas safras agrícolas (2011/2012 e 2012/2013), onde o método aplicado à coleta de dados foi sendo aperfeiçoado e adaptado às condições do estudo de acordo com as análises preliminares bem como com a disponibilidade de recursos.

### 5.2.2. Amostragem

O início das campanhas de campo para aquisição das informações relativas as variáveis biométricas da cana-de-açúcar e coleta das folhas, ocorreu em março de 2011. Isto foi devido à necessidade de padronizar o período de permanência da cultura no campo, pois para o primeiro corte as áreas com cana, correspondentes às épocas estudadas neste projeto, tinham 12 (março), 15 (junho), 17 (agosto) e 20 (novembro) meses de idade, em 2010.

Como citado por Casagrande (1991), as folhas foram numeradas pelo sistema de Kuijper (Figura 2). As coletas das folhas ocorreram no início da segunda quinzena de cada época. Como existem divergências na literatura de qual folha usar (folha diagnóstico), a avaliação foi definida pela amostragem de dez plantas por parcela por época, coletando dez folhas +1 (Raij e Cantarella, 1997), como também, dez folhas +3 (Malavolta, 1992), totalizando 360 folhas por campanha de campo.

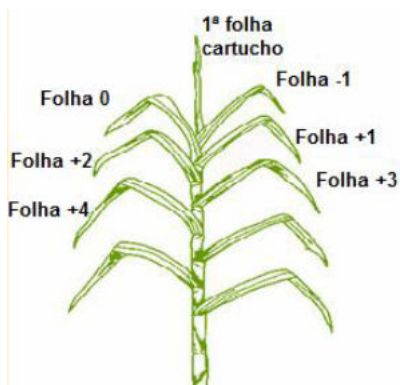


Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper (Casagrande, 1991).

No procedimento de coleta, dividiu-se a folha em três partes, cortando a parte central com aproximadamente 0,30 m. As folhas foram identificadas, separadas em sacos plásticos e acondicionadas em câmaras úmidas com temperaturas reduzidas para evitar-se a degradação das mesmas antes de serem encaminhadas ao laboratório e armazenadas no refrigerador até o momento das leituras (Tisot, 2009; Brandelero et al., 2012; Silva et al., 2012).

### 5.2.3. Produtividade da cana-de-açúcar

As avaliações de produtividade foram realizadas nas duas linhas centrais de cada parcela experimental, em cada época de colheita, foi feita pela obtenção da massa (kg), com balança eletrônica, graduada em 50 g (Figura 3c). A produtividade de cana (tonelada de cana por hectare - TCH), em  $\text{Mg ha}^{-1}$ , foi calculada por meio da massa de 30 colmos industrializáveis por parcela. Foram somadas à massa final as massas de cada feixe retirado para avaliação da qualidade tecnológica.

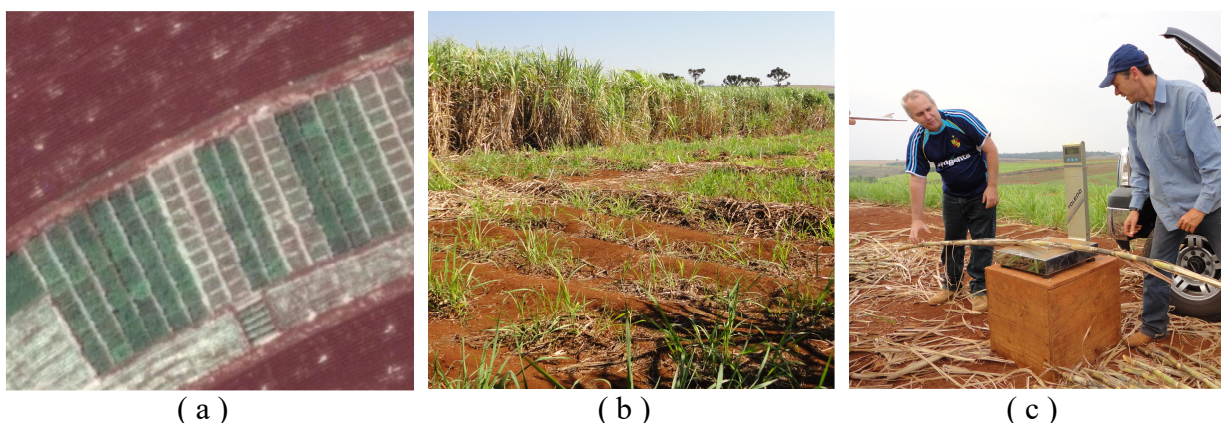


Figura 3. Área experimental ( a ); Parcelas ( b ); Pesagem dos colmos da cana-de-açúcar ( c ).

### 5.2.4. Colorimetria

A cor foi avaliada pela reflectância no espaço de cor CIELab, usando o colorímetro Minolta CR-400, com iluminante padrão D65 e ângulo de observação de 2°, seguindo a metodologia definida pelo fabricante (Minolta, 1998). Os parâmetros de cor indicam a luminosidade ( $L^*$ ) com valor máximo de 100, e representa uma perfeita reflexão difusa, enquanto que o valor mínimo é zero e constitui o preto. A tonalidade da amostra não apresenta limite numérico específico, porém toma-se como referência o valor de 60 unidades de cor ( $+a^*$  direção para o vermelho,  $-a^*$  direção para o verde,  $+b^*$  direção para o amarelo e  $-b^*$  direção para o azul) conforme mostrado na Figura 4. O croma ( $C^*$ ) expressa a saturação ou intensidade da cor, enquanto o ângulo de matiz ( $h^\circ$ ) indica a cor observável e é definido como

iniciando no eixo  $+a^*$ , em graus, em que  $0^\circ$  é  $+a^*$  (vermelho),  $90^\circ$  é  $+b^*$  (amarelo),  $180^\circ$  é  $-a^*$  (verde), e  $270^\circ$  é  $-b^*$  (azul) (Hunterlab, 1996; Gaya e Ferraz, 2006).

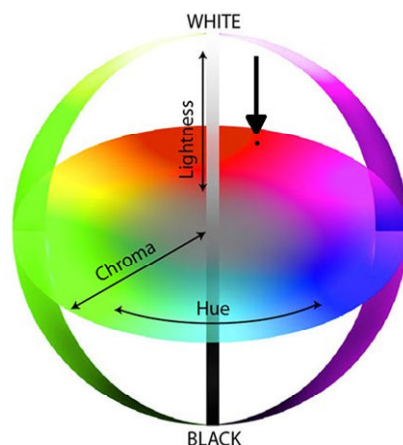


Figura 4. Espaço de cor CIELab.

As leituras de cor foram realizadas no Laboratório de Sensoriamento Remoto do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá. As leituras foram obtidas pela movimentação do equipamento em "zigue-zague", em três posições distintas, de tal maneira que praticamente toda a superfície da folha foi amostrada. Os parâmetros colorimétricos determinados foram  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e calculados  $C^*$  e  $h^\circ$ . Foi utilizada uma manta de borracha preta com 5 mm de espessura como base de apoio para as folhas. Para a análise estatística estabeleceu-se a leitura média das três medidas.

#### 5.2.5. Análises estatísticas

A partir do experimento de campo, as informações numéricas, amostra da população, foram obtidas com a finalidade de acumular informação para a tomada de decisão. Para tanto técnicas estatísticas foram aplicadas a este conjunto de dados para validar as informações e deles extrair conclusões.

Assim, antes da aplicação dos testes estatísticos, verificou-se a normalidade dos conjuntos de dados por meio do teste W (Shapiro e Wilk, 1965).

Os parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h^\circ$ ) foram analisados por procedimentos de análise estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão da média, valor máximo e valor mínimo), utilizando-se o pacote estatístico STATISTICA versão 10 (2010). Também foram determinados os quartis superiores (QS), quartis inferiores (QI) e a amplitude interquartis (AI), necessários para avaliar se dados periféricos podem ser considerados candidatos a "outliers" (Libardi et al., 1996; Gonçalves, 1997).

$$AI = QS - QI \quad (\text{eq. 1})$$

Os limites, inferior (LI) e superior (LS), para a caracterização de dados de comportamento possivelmente atípico, foram definidos pelas equações:

$$LI = QI - 1,5 * AI \quad (\text{eq. 2})$$

$$LS = QS + 1,5 * AI \quad (\text{eq. 2})$$

Nos casos em que os parâmetros estudados apresentaram valores discrepantes (“outliers”), esses foram descartados e, nessas situações, foram aplicados novamente os procedimentos da análise descritiva sem os valores discrepantes.

Em seguida foi realizada análise exploratória dos dados, premissa inicial para verificar e descrever as medidas estatísticas e matemáticas dos dados, o que melhora a eficiência da análise estatística (Farias, 1999). Após isto, os dados para cada variedade nas quatro épocas de colheita, foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas por meio do teste estatístico de *Tukey*, considerando 95% de confiança, no pacote estatístico ASSISTAT Versão 7.6 beta (2012).

Posteriormente foi montada a matriz de correlação de *Pearson*, identificando as correlações significativas entre os parâmetros colorimétricos e a produção, no programa Statistica 10.

### **5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O sumário da estatística descritiva dos parâmetros de cor, após remoção dos valores externos aos limites inferior e superior, é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Estatística descritiva dos parâmetros de cor para as safras 2011/12 e 2012/13.

| Medidas estatísticas | Variedade/<br>folha | 2011/12 |        |       |       |        | 2012/13 |        |       |       |        |
|----------------------|---------------------|---------|--------|-------|-------|--------|---------|--------|-------|-------|--------|
|                      |                     | L*      | (-) a* | b*    | C*    | (-) h° | L*      | (-) a* | b*    | C*    | (-) h° |
| Média                | 454+1               | 43,81   | 7,04   | 21,56 | 22,85 | 1,26   | 38,30   | 5,66   | 17,95 | 19,10 | 1,26   |
| Mediana              |                     | 44,28   | 7,78   | 21,28 | 22,66 | 1,24   | 40,24   | 6,44   | 18,56 | 18,95 | 1,23   |
| Desvio padrão        |                     | 2,70    | 3,23   | 2,29  | 2,79  | 0,12   | 6,08    | 3,32   | 2,77  | 2,81  | 0,17   |
| CV                   |                     | 0,06    | 0,46   | 0,11  | 0,12  | 0,10   | 0,16    | 0,59   | 0,16  | 0,15  | 0,14   |
| Média                | 454+3               | 42,56   | 5,95   | 20,99 | 21,96 | 1,30   | 37,87   | 4,48   | 17,48 | 18,26 | 1,31   |
| Mediana              |                     | 43,13   | 6,16   | 20,98 | 21,97 | 1,29   | 39,45   | 4,39   | 18,04 | 18,37 | 1,31   |
| Desvio padrão        |                     | 2,80    | 2,81   | 2,01  | 2,37  | 0,12   | 5,40    | 2,74   | 2,61  | 2,55  | 0,15   |
| CV                   |                     | 0,07    | 0,47   | 0,10  | 0,11  | 0,09   | 0,14    | 0,62   | 0,15  | 0,14  | 0,11   |
| Média                | 5054+1              | 46,82   | 11,59  | 23,89 | 26,59 | 1,12   | 40,92   | 10,57  | 19,46 | 22,19 | 1,07   |
| Mediana              |                     | 46,91   | 11,60  | 24,20 | 26,79 | 1,12   | 42,98   | 11,30  | 19,53 | 22,82 | 1,07   |
| Desvio padrão        |                     | 2,73    | 1,15   | 2,23  | 2,07  | 0,05   | 5,32    | 1,99   | 2,72  | 3,08  | 0,06   |
| CV                   |                     | 0,06    | 0,10   | 0,09  | 0,08  | 0,05   | 0,13    | 0,19   | 0,14  | 0,14  | 0,06   |
| Média                | 5054+3              | 46,13   | 10,48  | 22,30 | 24,69 | 1,13   | 40,25   | 9,47   | 19,49 | 21,75 | 1,12   |
| Mediana              |                     | 46,04   | 10,79  | 22,23 | 24,80 | 1,12   | 42,67   | 10,02  | 19,64 | 22,21 | 1,10   |
| Desvio padrão        |                     | 1,80    | 1,64   | 2,22  | 2,19  | 0,07   | 5,65    | 2,08   | 2,33  | 2,47  | 0,09   |
| CV                   |                     | 0,04    | 0,16   | 0,10  | 0,09  | 0,06   | 0,14    | 0,22   | 0,12  | 0,11  | 0,08   |
| Média                | 5156+1              | 49,47   | 9,54   | 26,54 | 28,50 | 1,18   | 42,61   | 10,47  | 20,02 | 22,67 | 1,09   |
| Mediana              |                     | 48,35   | 10,66  | 26,71 | 29,04 | 1,17   | 43,86   | 11,39  | 20,33 | 23,17 | 1,08   |
| Desvio padrão        |                     | 5,08    | 3,52   | 4,58  | 4,06  | 0,32   | 5,09    | 2,69   | 3,83  | 4,33  | 0,08   |
| CV                   |                     | 0,10    | 0,37   | 0,17  | 0,14  | 0,27   | 0,12    | 0,26   | 0,19  | 0,19  | 0,07   |
| Média                | 5156+3              | 48,53   | 9,19   | 25,62 | 27,45 | 1,22   | 41,27   | 9,67   | 19,39 | 21,76 | 1,11   |
| Mediana              |                     | 47,91   | 10,02  | 25,33 | 27,42 | 1,18   | 42,34   | 10,50  | 19,30 | 21,96 | 1,10   |
| Desvio padrão        |                     | 4,28    | 3,15   | 3,83  | 3,43  | 0,13   | 4,92    | 2,51   | 3,03  | 3,35  | 0,10   |
| CV                   |                     | 0,09    | 0,34   | 0,15  | 0,13  | 0,11   | 0,12    | 0,26   | 0,16  | 0,15  | 0,09   |

Tabela 1. Cont.

|               |        |       |       |       |       |      |       |       |       |       |      |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| Média         | 5453+1 | 48,95 | 10,80 | 36,30 | 38,50 | 1,19 | 41,82 | 11,46 | 20,83 | 23,81 | 1,07 |
| Mediana       |        | 47,94 | 11,41 | 26,08 | 28,66 | 1,16 | 43,36 | 12,25 | 20,95 | 24,26 | 1,06 |
| Desvio padrão |        | 3,55  | 2,53  | 92,71 | 92,48 | 0,09 | 5,89  | 2,19  | 3,80  | 4,20  | 0,05 |
| CV            |        | 0,07  | 0,24  | 2,57  | 2,42  | 0,08 | 0,14  | 0,19  | 0,18  | 0,18  | 0,05 |
| Média         | 5453+3 | 47,07 | 9,48  | 25,82 | 27,63 | 1,22 | 41,40 | 9,71  | 20,42 | 22,72 | 1,13 |
| Mediana       |        | 46,04 | 9,82  | 25,41 | 27,48 | 1,21 | 42,79 | 10,45 | 20,22 | 22,92 | 1,10 |
| Desvio padrão |        | 3,34  | 2,83  | 3,04  | 3,24  | 0,10 | 5,15  | 2,60  | 2,78  | 3,07  | 0,10 |
| CV            |        | 0,07  | 0,30  | 0,12  | 0,12  | 0,08 | 0,12  | 0,27  | 0,14  | 0,14  | 0,09 |
| Média         | 5536+1 | 45,86 | 9,85  | 22,10 | 24,28 | 1,15 | 40,66 | 9,48  | 16,91 | 19,46 | 1,06 |
| Mediana       |        | 45,83 | 10,25 | 21,62 | 24,08 | 1,12 | 41,96 | 10,79 | 17,45 | 20,48 | 1,04 |
| Desvio padrão |        | 2,57  | 1,89  | 2,57  | 2,40  | 0,09 | 5,29  | 2,42  | 3,34  | 3,80  | 0,09 |
| CV            |        | 0,06  | 0,19  | 0,12  | 0,10  | 0,08 | 0,13  | 0,26  | 0,20  | 0,20  | 0,08 |
| Média         | 5536+3 | 45,07 | 9,16  | 21,75 | 23,72 | 1,17 | 39,87 | 7,42  | 16,98 | 18,78 | 1,16 |
| Mediana       |        | 45,18 | 9,81  | 21,82 | 23,65 | 1,16 | 41,23 | 8,16  | 17,30 | 19,33 | 1,11 |
| Desvio padrão |        | 2,70  | 2,40  | 2,43  | 2,43  | 0,10 | 4,77  | 3,16  | 2,41  | 2,59  | 0,16 |
| CV            |        | 0,06  | 0,26  | 0,11  | 0,10  | 0,09 | 0,12  | 0,43  | 0,14  | 0,14  | 0,14 |
| Média         | 6928+1 | 48,07 | 10,49 | 24,32 | 26,57 | 1,16 | 40,40 | 10,78 | 18,63 | 21,55 | 1,04 |
| Mediana       |        | 47,83 | 11,05 | 24,46 | 26,64 | 1,15 | 42,55 | 11,54 | 18,74 | 22,14 | 1,04 |
| Desvio padrão |        | 3,78  | 2,21  | 3,34  | 3,46  | 0,08 | 6,15  | 2,13  | 3,80  | 4,20  | 0,05 |
| CV            |        | 0,08  | 0,21  | 0,14  | 0,13  | 0,07 | 0,15  | 0,20  | 0,20  | 0,20  | 0,05 |
| Média         | 6928+3 | 46,86 | 10,22 | 23,81 | 26,03 | 1,16 | 39,45 | 10,00 | 18,11 | 20,76 | 1,07 |
| Mediana       |        | 46,56 | 10,77 | 23,76 | 26,00 | 1,14 | 41,42 | 10,85 | 18,17 | 21,22 | 1,05 |
| Desvio padrão |        | 3,76  | 2,20  | 3,20  | 3,02  | 0,09 | 5,86  | 2,20  | 3,13  | 3,39  | 0,09 |
| CV            |        | 0,08  | 0,22  | 0,14  | 0,12  | 0,08 | 0,15  | 0,22  | 0,17  | 0,16  | 0,08 |

CV: Coeficiente de variação.

Pela estatística descritiva dos dados apresentados na Tabela 1, a proximidade dos valores da média e da mediana, para a maioria das variáveis, sugere distribuição normal dos dados, igualmente verificada pelo teste W. Ainda com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), para classificar o coeficiente de variação (CV), este permitiu caracterizar os valores de baixa a média variação, evidenciando que mesmo em condições de campo o ambiente era bem homogêneo.

O parâmetro colorimétrico  $a^*$  (tonalidade vermelho-verde) foi o que teve maior variação. Tal fato pode ser atribuído a pequenas manchas necrosadas nas folhas, causadas pela ferrugem, e que diminuíram a intensidade do verde, e que embora apresentem alguns valores elevados, estas distribuições não apresentaram caudas, excessivamente, alongadas que poderiam comprometer a análise.

Com base na análise exploratória preliminar, assumiu-se que as distribuições podem ser consideradas suficientemente simétricas e com caudas não alongadas, portanto foi possível trabalhar com os dados originais sem transformação.

Nas Tabelas 2 a 5 observam-se os valores médios das coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C$  e  $h^\circ$ , respectivamente, para as quatro épocas de colheita, seis variedades, duas folhas diagnósticas e dois anos safra, 2011/12 e 2012/13.

Tabela 2. Valores médios de luminosidade (L\*), de intensidade (-) a\* (componente vermelho-verde) e de intensidade b\* (componente amarelo-azul) para o ano safra 2011/12.

| Variedade /<br>folha | L*       |              |            |             | (-) a*    |           |            |          | b*       |          |          |          |
|----------------------|----------|--------------|------------|-------------|-----------|-----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | Março    | Junho        | Agosto     | Novembro    | Março     | Junho     | Agosto     | Novembro | Março    | Junho    | Agosto   | Novembro |
| 72454 +1             | 42,86 Aa | 42,30 Aef    | 44,66 Abc  | 44,48 Abc   | 7,86 Abc  | 5,48 Acd  | 8,19 Aabc  | 6,84 Abc | 19,50 Aa | 21,37 Aa | 22,16 Ab | 21,13 Aa |
| 72454 +3             | 40,88 Aa | 41,49 Af     | 42,56 Ac   | 43,63 Ac    | 5,16 Ac   | 4,91 Ad   | 6,46 Ac    | 5,68 Ac  | 18,74 Aa | 20,60 Aa | 21,62 Ab | 20,74 Aa |
| 835054 +1            | 43,20 Ba | 45,13 ABcdef | 47,85 Aab  | 47,47 Aabc  | 11,61 Aa  | 11,41 Aa  | 11,31 Aa   | 12,05 Aa | 19,12 Aa | 22,82 Aa | 24,83 Ab | 24,01 Aa |
| 835054 +3            | 42,61 Ba | 45,26 ABcdef | 46,66 Aabc | 46,44 Aabc  | 11,50 Aa  | 10,86 Aa  | 9,86 Aab   | 10,70 Aa | 19,21 Aa | 23,26 Aa | 20,15 Ab | 23,46 Aa |
| 855156 +1            | 43,89 Ca | 53,38 Aa     | 48,67 Bab  | 46,65 BCabc | 11,93 Aa  | 7,06 Bbcd | 9,79 ABabc | 11,05 Aa | 19,65 Aa | 29,48 Aa | 27,34 Ab | 22,77 Aa |
| 855156 +3            | 43,38 Ca | 51,38 Aab    | 48,06 ABab | 46,14 BCabc | 11,54 Aa  | 6,19 Bcd  | 9,10 ABabc | 10,54 Aa | 19,19 Aa | 27,94 Aa | 26,49 Ab | 22,41 Aa |
| 855453 +1            | 43,81 Ba | 48,01 Abcd   | 49,93 Aa   | 48,88 Aa    | 12,46 Aa  | 11,23 Aa  | 10,03 Aab  | 10,90 Aa | 20,04 Ba | 26,52 Ba | 56,76 Aa | 25,61 Aa |
| 855453 +3            | 43,48 Ba | 46,21 ABcde  | 48,73 Aab  | 46,26 ABabc | 11,51 Aa  | 10,07 Aab | 9,05 Aabc  | 9,29 Aab | 19,81 Aa | 25,58 Aa | 27,37 Ab | 24,50 Aa |
| 855536 +1            | 42,17 Ba | 44,65 ABdef  | 46,16 Aabc | 46,76 Aabc  | 11,02 Aab | 10,00 Aab | 8,35 Aabc  | 11,20 Aa | 17,00 Aa | 21,87 Aa | 23,07 Ab | 21,34 Aa |
| 855536 +3            | 42,30 Ba | 43,50 ABef   | 45,45 ABbc | 46,23 Aabc  | 10,45 Aab | 8,85 Aabc | 7,93 Abc   | 10,70 Aa | 17,19 Aa | 20,95 Aa | 22,53 Ab | 21,75 Aa |
| 966928 +1            | 43,36 Ba | 48,87 Abc    | 46,78 ABab | 48,55 Aab   | 11,98 Aa  | 10,53 Aa  | 9,51 Aabc  | 11,39 Aa | 18,66 Aa | 22,79 Aa | 25,19 Ab | 24,98 Aa |
| 966928 +3            | 41,71 Ba | 47,97 Abcd   | 46,33 Aabc | 46,27 Aabc  | 11,59 Aa  | 9,98 Aab  | 9,72 Aabc  | 10,96 Aa | 18,04 Aa | 22,88 Aa | 25,21 Ab | 23,34 Aa |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

Como apresentado na Tabela 2, os parâmetros colorimétricos L\*a\* e b\* foram pouco sensíveis para discriminar variedades/folhas na safra 2011/12. Para a componente L\* (luminosidade), na época de março, houve diferença significativa entre as variedades RB 72454 e RB 855156 e destas para as demais, mas não distinguiu entre folhas diagnósticas +1 e +3.

Quando observa-se a interação das variedades/folhas e épocas, as diferenças aconteceram, principalmente entre as épocas de março e junho, tanto para variedades quanto folhas diagnósticas. Para o parâmetro a\* (intensidade vermelho-verde), a variedade RB 855156+1 foi a que apresentou diferença significativa das demais. Para a interação variedade/folha e épocas, a época de junho é que registrou diferença para as variedades RB 72454+3 e RB 855156+1 e RB 855156+3. Já para o parâmetro b\* (intensidade amarelo-azul), o mesmo discriminou a RB 855453+1 das demais nas épocas março e junho. Agora, quando se analisa as variedades/folhas dentro de épocas, agosto foi a que diferenciou-se das demais épocas e isto ocorreu em todas as variedades/folhas.

Tabela 3. Valores médios de croma (C), ângulo de matiz (h°) para o ano safra 2011/12.

| Variedade/<br>folha | C*       |          |          |          | h°       |         |          |          |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
|                     | Março    | Junho    | Março    | Junho    | Março    | Junho   | Março    | Junho    |
| 72454 +1            | 21,22 Aa | 22,37 Aa | 23,75 Ab | 22,43 Aa | 1,08 ABa | 1,02 Ba | 1,11 ABa | 1,27 Aa  |
| 72454 +3            | 19,67 Aa | 21,43 Aa | 22,72 Ab | 21,72 Aa | 1,10 ABa | 1,03 Ba | 1,28 Aa  | 1,10 ABa |
| 835054 +1           | 22,40 Aa | 25,57 Aa | 27,32 Ab | 26,88 Aa | 1,02 Aa  | 1,10 Aa | 1,14 Aa  | 1,10 Aa  |
| 835054 +3           | 22,39 Aa | 25,71 Aa | 22,53 Ab | 25,82 Aa | 1,03 Aa  | 1,13 Aa | 1,11 Aa  | 1,14 Aa  |
| 855156 +1           | 22,99 Aa | 30,98 Aa | 29,15 Ab | 25,35 Aa | 1,02 ABa | 0,90 Ba | 1,22 Aa  | 1,11 ABa |
| 855156 +3           | 22,40 Aa | 29,38 Aa | 28,15 Ab | 24,81 Aa | 1,02 ABa | 0,92 Ba | 1,23 Aa  | 1,13 ABa |
| 855453 +1           | 23,60 Aa | 28,93 Aa | 58,63 Ab | 27,91 Aa | 1,01 Aa  | 1,16 Aa | 1,12 Aa  | 1,17 Aa  |
| 855453 +3           | 22,93 Aa | 27,58 Aa | 28,91 Ab | 26,39 Aa | 1,04 Aa  | 1,19 Aa | 1,25 Aa  | 1,11 Aa  |
| 855536 +1           | 20,27 Aa | 24,13 Aa | 24,60 Ab | 24,11 Aa | 0,99 Aa  | 1,13 Aa | 1,22 Aa  | 1,08 Aa  |
| 855536 +3           | 20,13 Aa | 22,93 Aa | 23,94 Ab | 24,29 Aa | 1,02 Aa  | 1,17 Aa | 1,23 Aa  | 1,11 Aa  |
| 966928 +1           | 22,18 Aa | 25,14 Aa | 26,99 Ab | 27,55 Aa | 0,99 Aa  | 1,13 Aa | 1,20 Aa  | 1,04 Aa  |
| 966928 +3           | 21,45 Aa | 25,06 Aa | 27,13 Ab | 25,88 Aa | 0,99 Aa  | 1,15 Aa | 1,19 Aa  | 1,13 Aa  |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

Pela Tabela 3, o parâmetro colorimétrico C\* (croma), não registrou diferença significativa entre as variedades/folhas em nenhuma das quatro épocas estudadas, também o mesmo comportamento aconteceu na interação variedades/folhas e épocas.

A tonalidade ( $h^{\circ}$ ), nesta safra, pouco apresentou diferença entre as variedades/folhas, sendo evidenciada apenas nas variedades RB 72454 e RB 855156, apenas em junho, das demais. Isto talvez tenha acontecido pela baixa de temperatura, que condicionou este comportamento.

Para a interação a tonalidade comportou-se de modo análogo ao Croma, ou seja, também não foi um parâmetro sensível o suficiente para discriminar variedades, folhas e épocas.

Tabela 4. Valores médios de luminosidade (L\*), de intensidade (-) a\* (componente vermelho-verde) e de intensidade b\* (componente amarelo-azul) para o ano safra 2012/13.

| Variedade<br>/folha | L          |           |            |            | (-) a*   |            |            |          | b*        |            |             |             |
|---------------------|------------|-----------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|-----------|------------|-------------|-------------|
|                     | Março      | Junho     | Agosto     | Novembro   | Março    | Junho      | Agosto     | Novembro | Março     | Junho      | Agosto      | Novembro    |
| 72454 +1            | 26,23 Babc | 38,91 Ab  | 42,74 Aabc | 28,67 Bc   | 5,51 Abc | 1,28 Be    | 5,26 Ad    | 7,21 Aab | 13,54 Bab | 18,33 Abc  | 20,05 Acde  | 13,89 Bcde  |
| 72454 +3            | 24,88 Cc   | 38,93 Ab  | 41,45 Ac   | 30,23 Bbc  | 3,59 Bc  | 2,29 Bce   | 1,43 Ce    | 6,05 Ab  | 13,02 Bab | 18,02 Ac   | 19,15 Ade   | 13,98 Bcde  |
| 835054 +1           | 27,54 Cabc | 42,75 Aab | 44,97 Aabc | 32,75 Babc | 7,95 Ba  | 11,74 Aab  | 11,14 Aabc | 7,77 Bab | 13,90 Bab | 20,81 Aab  | 22,00 Abc   | 15,89 Babcd |
| 835054 +3           | 27,30 Babc | 42,74 Aab | 44,05 Aabc | 31,59 Babc | 7,51 Abc | 9,46 Acd   | 9,32 Ac    | 7,59 Aab | 13,85 Cab | 20,48 Aabc | 21,63 Abcd  | 16,61 Bab   |
| 855156 +1           | 29,96 Cab  | 44,93 Aa  | 46,37 Aab  | 35,23 Ba   | 8,02 Ba  | 11,83 Aab  | 11,39 Aabc | 6,74 Bab | 15,53 Ba  | 22,13 Aa   | 23,14 Aab   | 15,14 Babcd |
| 855156 +3           | 28,19 Cabc | 42,76 Aab | 44,78 Aabc | 34,18 Bab  | 7,14 Bab | 10,59 Aabc | 9,64 Ac    | 6,9 Bab  | 15,16 Bab | 20,14 Aabc | 21,91 Abc   | 16,29 Babc  |
| 855453 +1           | 27,79 Cabc | 27,79 Aa  | 47,04 Aa   | 32,90 Babc | 8,51 Ba  | 12,50 Aa   | 12,62 Aa   | 8,22 Ba  | 14,65 Cab | 22,32 Ba   | 24,83 Aa    | 16,12 Cabcd |
| 855453 +3           | 27,26 Cabc | 27,26 Aab | 45,54 Aabc | 34,29 Bab  | 8,14 Aa  | 9,75 Abcd  | 9,52 Ac    | 7,88 Aab | 14,69 Dab | 20,79 Bab  | 23,39 Aab   | 17,66 Ca    |
| 855536 +1           | 26,53 Cabc | 26,53 Aab | 44,70 Aabc | 33,42 Bab  | 7,94 BCa | 11,05 Aabc | 9,68 ABc   | 6,16 Cab | 13,08 Bab | 18,36 Abc  | 20,24 Acde  | 12,03 Be    |
| 855536 +3           | 25,74 Cbc  | 25,74 Aab | 42,16 Abc  | 33,18 Bab  | 7,13 Aab | 7,74 Ad    | 3,78 Bd    | 6,79 Aab | 12,96 Bb  | 18,18 Ac   | 18,72 Ae    | 13,83 Bcde  |
| 966928 +1           | 30,39 Ba   | 30,39 Aab | 45,13 Aabc | 30,56 Bbc  | 8,27 Ba  | 11,80 Aabc | 11,91 Abc  | 7,41 Bab | 15,34 Cab | 19,84 Babc | 22,31 Aabc  | 13,69 Cde   |
| 966928 +3           | 28,80 Babc | 28,80 Aab | 44,10 Aabc | 30,13 Bbc  | 7,75 Ba  | 11,09 Aabc | 9,95 Abc   | 7,36 Bab | 14,45 Bab | 18,96 Abc  | 21,22 Abcde | 14,21 Bbcde |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

Analisando a Tabela 4, safra 2012/13, percebe-se que os parâmetros colorimétricos  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  apresentaram valores bem inferiores comparativamente à safra 2011/12. Isto é devido provavelmente a precipitação ter sido menor, causando alteração da coloração das folhas.

Os dados relativos ao ano safra 2012/13, ao defrontar-se com o teste de Tukey, nota-se que para a componente  $L^*$  houve diferença significativa para as variedades RB 72454 +1, RB 835054+3 e RB 966928 (+1 e +3) na época de março, das demais variedades, mas não entre elas. Olhando para a interação, as diferenças mais expressivas ocorreram na variedade RB 72454+3 entre março e junho.

Os valores do parâmetro  $a^*$  (intensidade vermelho-verde) obtido pelo colorímetro, mostraram que a diferença mais marcante ficou com variedade RB 72454 (folhas +1 e +3), distinguindo-se das demais na segunda época, junho. Também esta variedade mostrou diferença entre as quatro épocas, apenas para folha +1.

As respostas espectrais captadas pelo sensor para o parâmetro  $b^*$  (intensidade amarelo-azul), distinguiram a variedade RB 855453 (folhas +1 e +3), em novembro do restante. Na interação variedade e épocas, a RB 72454+3 apresentou diferenças nas três primeiras épocas (março, junho e agosto).

De forma geral, a diferenciação entre variedades/folhas e épocas, ficou pouco evidente, neste trabalho, contudo a variedade RB 72454 é a que mais registrou diferença tanto nas variedades quanto na interação com as épocas. Talvez por suas folhas apresentarem características morfológicas bem particular, como coloração mais marrom, e manchas necróticas.

Os valores de  $C$  e  $h^\circ$  calculados para a safra 2012/12 são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios de croma (C), ângulo de matiz (h°) para o ano safra 2012/13.

| Variedade/<br>folha | C*         |            |            |             | h°      |          |          |          |
|---------------------|------------|------------|------------|-------------|---------|----------|----------|----------|
|                     | Março      | Junho      | Agosto     | Novembro    | Março   | Junho    | Agosto   | Novembro |
| 72454 +1            | 14,66 Bbc  | 18,50 Ae   | 21,00 Ade  | 15,67 Bbcde | 1,18 Aa | 0,55 Cc  | 0,91 Bab | 1,09 ABa |
| 72454 +3            | 13,59 Bc   | 18,42 Ae   | 19,68 Ae   | 15,26 Bde   | 1,30 Aa | 0,80 Bbc | 0,46 Cc  | 1,16 Aa  |
| 835054 +1           | 16,02 Babc | 23,91 Aabc | 24,69 Abc  | 17,73 Babcd | 1,05 Aa | 1,05 Aab | 1,10 Aa  | 1,11 Aa  |
| 835054 +3           | 15,77 Babc | 22,65 Abcd | 23,64 Abcd | 18,30 Bab   | 1,07 Aa | 1,13 Aa  | 1,16 Aa  | 1,14 Aa  |
| 855156 +1           | 17,51 Ba   | 25,22 Aab  | 25,84 Aab  | 16,59 Bbcd  | 1,09 Aa | 1,07 Aab | 1,11 Aa  | 1,14 Aa  |
| 855156 +3           | 16,82 Bab  | 22,84 Abc  | 24,05 Abc  | 17,74 Babcd | 1,12 Aa | 1,08 Aab | 1,16 Aa  | 1,16 Aa  |
| 855453 +1           | 16,95 Bab  | 25,60 Aa   | 27,89 Aa   | 18,11 Babc  | 1,04 Aa | 1,05 Aab | 1,09 Aa  | 1,10 Aa  |
| 855453 +3           | 16,81 Bab  | 23,10 Aabc | 25,43 Aab  | 19,41 Ba    | 1,06 Aa | 1,13 Aa  | 1,08 Aa  | 1,15 Aa  |
| 855536 +1           | 15,31 Babc | 21,45 Acd  | 22,54 Acd  | 13,55 Be    | 1,02 Aa | 1,02 Aab | 1,12 Aa  | 1,10 Aa  |
| 855536 +3           | 14,83 Babc | 19,97 Ade  | 19,54 Ae   | 15,45 Bcde  | 1,06 Aa | 1,07 Aab | 0,65 Bbc | 1,11 Aa  |
| 966928 +1           | 17,44 Ba   | 23,11 Aabc | 25,31 Aab  | 15,59 Bbcde | 1,07 Aa | 1,03 Aab | 1,07 Aa  | 1,07 Aa  |
| 966928 +3           | 16,42 Bab  | 21,98 Acd  | 23,57 Abcd | 16,04 Bbcde | 1,07 Aa | 1,03 Aab | 1,13 Aa  | 1,09 Aa  |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

A Tabela 5 demonstra que o parâmetro colorimétrico C\* não revelou diferença significativa entre as variedades/folhas em nenhuma das quatro épocas estudadas. Observando a interação, a RB 72454 (+1 e +3) exibiu nas épocas de março e junho diferença significativa.

O ângulo de matiz (h°) apresentou pequena diferença entre as variedades nas épocas, isso ocorreu com a RB 72454 em junho e agosto. Para a interação, esta mesma variedade também diferiu significativamente entre as épocas, tanto na folha +1 quanto na folha+3.

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 2 a 5, o uso do colorímetro nas folhas +1 e +3 registrou que as componentes L\*a\*b\* e C\*h° pouco variaram, significativamente. Como este é um dos primeiros trabalhos com enfoque da cor na produtividade e discriminação de variedades de cana, novos trabalhos nesta linha devem ser realizados para corroborarem ou não com os resultados aqui obtidos.

Devido a essa constatação, as folhas mais largas que estiverem sadias são as mais indicadas para a medição, pois elas são mais fáceis de medir e diminuem a chance de entrada de luz na câmara de medição gerando um valor mais confiável.

A Tabela 6 traz os valores de TCH dos dois anos safras.

Tabela 6. Valores médios de TCH (tonelada de cana por hectare) para os anos safra 2011/12 e 2012/13.

| Variedade /<br>folha | 2011/12    |             |            |           | 2012/13   |            |            |            |
|----------------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|                      | Março      | Junho       | Agosto     | Novembro  | Março     | Junho      | Agosto     | Novembro   |
| 72454 +1             | 69,40 Bab  | 103,81 ABc  | 115,06 Aa  | 63,12 Bb  | 45,01 Ab  | 71,79 Ab   | 67,80 Ac   | 42,17 Ac   |
| 72454 +3             | 69,40 Bab  | 103,81 ABc  | 115,06 Aa  | 63,12 Bb  | 45,01 Ab  | 71,79 Ab   | 67,80 Ac   | 42,17 Ac   |
| 835054 +1            | 93,63 ABab | 124,37 Abc  | 108,56 Aa  | 64,25 Bb  | 58,88 Aab | 84,76 Aab  | 86,73 Abc  | 56,75 Aabc |
| 835054 +3            | 93,63 ABab | 124,37 Abc  | 108,56 Aa  | 64,25 Bb  | 58,88 Aab | 84,76 Aab  | 86,73 Abc  | 56,75 Aabc |
| 855156 +1            | 88,96 Bab  | 143,96 Aabc | 111,16 ABa | 76,13 Bab | 39,17 Cb  | 89,65 Aab  | 78,79 ABbc | 47,44 BCbc |
| 855156 +3            | 88,96 Bab  | 143,96 Aabc | 111,16 ABa | 76,13 Bab | 39,17 Cb  | 89,65 Aab  | 78,79 ABbc | 47,44 BCbc |
| 855453 +1            | 62,72 Bb   | 154,86 Aab  | 96,84 Ba   | 85,23 Bab | 43,00 Bb  | 87,08 Aab  | 77,92 Abc  | 45,52 Bbc  |
| 855453 +3            | 82,72 Bb   | 154,86 Aab  | 96,84 Ba   | 85,23 Bab | 43,00 Bb  | 87,08 Aab  | 77,92 Abc  | 45,52 Bbc  |
| 855536 +1            | 118,09 Ba  | 190,39 Aa   | 137,92 Ba  | 115,98 Ba | 88,43 Aa  | 100,96 Aab | 101,43 Aab | 76,31 Aab  |
| 855536 +3            | 118,09 Ba  | 190,39 Aa   | 137,92 Ba  | 115,98 Ba | 88,43 Aa  | 100,96 Aab | 101,43 Aab | 76,31 Aab  |
| 966928 +1            | 85,32 Bab  | 148,66 Aabc | 135,68 Aa  | 92,76 Bab | 56,97 Cab | 106,07 ABa | 124,85 Aa  | 89,64 Ba   |
| 966928 +3            | 85,32 Bab  | 148,66 Aabc | 135,68 Aa  | 92,76 Bab | 56,97 Cab | 106,07 ABa | 124,85 Aa  | 89,64 Ba   |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

Analisando-se, o valor do TCH (Tabela 6), a produtividade apresentou uma diferença significativa entre os dois anos safras. Esta constatação possivelmente pode ser explicada pela diferença de precipitação, onde no ano 2011 choveu 1698 mm contra 1433 mm em 2012.

Apesar desta variação na precipitação, em 2011/12 apenas a época de agosto registrou diferença de TCH entre as variedades, sendo a RB 855453 e RB 855536 as que evidenciaram esta diferença. Quanto a interação de variedades/folhas dentro de épocas, as RB 72454 e RB 835054 variaram o TCH nas épocas de junho, agosto e novembro, também a RB 845453 diferiu em março e agosto.

Na safra 2012/13, a variação significativa do TCH ocorreu em março e novembro, não diferindo em junho e agosto em nenhuma variedade. Já o resultado do TCH para as variedades dentro das épocas, apenas a RB 72454 registrou diferença estatística entre as duas primeira épocas, março e junho, e as duas épocas finais, agosto e novembro.

Até aqui, os parâmetros colorimétricos estudados nesta pesquisa apresentaram poucas diferenças significativas. Também os dados de produção, representados pelo TCH, não foram tão sensíveis, estatisticamente, para capturar diferenças entre as variedades e épocas.

As análises de correlação foram efetuadas para verificar se nas diferentes variedades, folhas diagnósticas e épocas de colheita existiu relação entre os parâmetros de cor, com a produtividade definida em tonelada de cana por hectare (TCH). Assim, as Tabelas 7 e 8 apresentam os valores das correlações de *Pearson* dos parâmetros colorimétricos (L\*, a\*, b\*, C\* e h°) com o TCH.

Tabela 7. Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2011/12.

| Var /<br>folhas | Março   |         |                |                |         |         |                |                |                |                |
|-----------------|---------|---------|----------------|----------------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | L       |         | (-) a          |                | b       |         | C              |                | (-) h          |                |
| 454+1           | -0,9152 | p=0,264 | 0,3916         | p=0,744        | -0,2429 | p=0,844 | -0,2182        | p=0,860        | -0,3012        | p=0,805        |
| 454+3           | -0,8485 | p=0,355 | -0,8851        | p=0,308        | 0,5260  | p=0,647 | <b>-0,9996</b> | <b>p=0,019</b> | 0,8771         | p=0,319        |
| 5054+1          | 0,9850  | p=0,110 | 0,9126         | p=0,268        | 0,9614  | p=0,177 | <b>0,9971</b>  | <b>p=0,048</b> | 0,0445         | p=0,972        |
| 5054+3          | 0,1245  | p=0,921 | <b>-0,9980</b> | <b>p=0,040</b> | -0,6226 | p=0,572 | -0,7241        | p=0,484        | 0,0332         | p=0,979        |
| 5156+1          | 0,6568  | p=0,544 | 0,9227         | p=0,252        | 0,7996  | p=0,410 | 0,8462         | p=0,358        | -0,9529        | p=0,196        |
| 5156+3          | -0,9818 | p=0,122 | 0,8822         | p=0,312        | -0,9176 | p=0,260 | -0,8199        | p=0,388        | <b>-0,9984</b> | <b>p=0,036</b> |
| 5453+1          | 0,4681  | p=0,690 | 0,9453         | p=0,212        | 0,6506  | p=0,549 | 0,8244         | p=0,383        | -0,1292        | p=0,918        |
| 5453+3          | 0,5222  | p=0,650 | -0,4989        | p=0,667        | 0,2315  | p=0,851 | 0,1480         | p=0,905        | 0,5655         | p=0,617        |
| 5536+1          | -0,2198 | p=0,859 | -0,0385        | p=0,975        | 0,5837  | p=0,603 | 0,6464         | p=0,553        | 0,4918         | p=0,673        |
| 5536+3          | -0,7233 | p=0,485 | 0,9206         | p=0,255        | -0,2850 | p=0,816 | -0,1687        | p=0,892        | -0,5411        | p=0,636        |
| 6928+1          | -0,5407 | p=0,636 | -0,7777        | p=0,433        | -0,9499 | p=0,202 | -0,9841        | p=0,114        | -0,7145        | p=0,493        |
| 6928+3          | 0,3610  | p=0,765 | 0,0381         | p=0,976        | 0,4755  | p=0,685 | 0,4048         | p=0,735        | 0,7777         | p=0,433        |

Tabela 7, Cont.

| Junho    |                |                |         |         |                |                |         |         |         |         |
|----------|----------------|----------------|---------|---------|----------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
|          | L              |                | (-) a   |         | b              |                | C       |         | (-) h   |         |
| 454+1    | -0,3075        | p=0,801        | 0,3075  | p=0,801 | -0,3075        | p=0,801        | -0,3139 | p=0,797 | -0,2434 | p=0,843 |
| 454+3    | 0,3075         | p=0,801        | 0,3075  | p=0,801 | 0,3075         | p=0,801        | 0,2640  | p=0,830 | -0,3277 | p=0,787 |
| 5054+1   | 0,3241         | p=0,790        | -0,9587 | p=0,184 | 0,3462         | p=0,775        | 0,1977  | p=0,873 | 0,7264  | p=0,482 |
| 5054+3   | <b>0,9999</b>  | <b>p=0,007</b> | -0,7783 | p=0,432 | 0,8462         | p=0,358        | 0,4480  | p=0,704 | 0,9213  | p=0,254 |
| 5156+1   | -0,9549        | p=0,192        | 0,9927  | p=0,077 | -0,9959        | p=0,058        | -0,9879 | p=0,099 | -0,9965 | p=0,054 |
| 5156+3   | -0,2204        | p=0,859        | 0,6638  | p=0,538 | -0,3816        | p=0,751        | -0,1261 | p=0,919 | -0,6205 | p=0,574 |
| 5453+1   | 0,2097         | p=0,865        | -0,1083 | p=0,931 | 0,2501         | p=0,839        | 0,2704  | p=0,826 | 0,1695  | p=0,892 |
| 5453+3   | 0,3024         | p=0,804        | -0,9288 | p=0,242 | 0,3346         | p=0,783        | -0,2588 | p=0,833 | 0,8450  | p=0,359 |
| 5536+1   | -0,1633        | p=0,896        | 0,9828  | p=0,118 | -0,2675        | p=0,828        | -0,0982 | p=0,937 | -0,6760 | p=0,527 |
| 5536+3   | -0,1633        | p=0,896        | 0,9828  | p=0,118 | -0,2675        | p=0,828        | -0,0982 | p=0,937 | -0,6760 | p=0,527 |
| 6928+1   | 0,7737         | p=0,437        | -0,8834 | p=0,310 | -0,5240        | p=0,649        | -0,6459 | p=0,553 | 0,9742  | p=0,145 |
| 6928+3   | 0,8600         | p=0,341        | -0,6984 | p=0,508 | 0,4256         | p=0,720        | 0,2726  | p=0,824 | 0,9745  | p=0,144 |
| agosto   |                |                |         |         |                |                |         |         |         |         |
|          | L              |                | (-) a   |         | b              |                | C       |         | (-) h   |         |
| 454+1    | -0,9255        | p=0,247        | -0,9826 | p=0,119 | -0,9929        | p=0,076        | -0,9909 | p=0,086 | 0,9704  | p=0,155 |
| 454+3    | -0,9548        | p=0,192        | -0,6387 | p=0,559 | <b>-0,9975</b> | <b>p=0,045</b> | -0,9741 | p=0,145 | 0,1583  | p=0,899 |
| 5054+1   | -0,8297        | p=0,377        | 0,9364  | p=0,228 | -0,9273        | p=0,244        | -0,9093 | p=0,273 | -0,9403 | p=0,221 |
| 5054+3   | -0,9720        | p=0,151        | 0,3823  | p=0,750 | -0,9785        | p=0,132        | -0,9878 | p=0,100 | -0,7285 | p=0,480 |
| 5156+1   | 0,3130         | p=0,797        | -0,2229 | p=0,857 | 0,2422         | p=0,844        | 0,2001  | p=0,872 | 0,8460  | p=0,358 |
| 5156+3   | -0,4378        | p=0,711        | 0,8612  | p=0,339 | -0,5049        | p=0,663        | -0,3020 | p=0,805 | -0,7909 | p=0,419 |
| 5453+1   | 0,2772         | p=0,821        | 0,5729  | p=0,612 | 0,1623         | p=0,896        | 0,2921  | p=0,811 | -0,8406 | p=0,364 |
| 5453+3   | 0,1100         | p=0,930        | 0,5592  | p=0,622 | 0,1741         | p=0,889        | 0,2658  | p=0,829 | -0,7992 | p=0,411 |
| 5536+1   | 0,5063         | p=0,662        | 0,0528  | p=0,966 | 0,9121         | p=0,269        | 0,9923  | p=0,079 | 0,2101  | p=0,865 |
| 5536+3   | -0,9735        | p=0,147        | -0,2074 | p=0,867 | -0,4333        | p=0,715        | -0,2703 | p=0,826 | 0,2065  | p=0,868 |
| 6928+1   | -0,1775        | p=0,886        | -0,1703 | p=0,891 | -0,9497        | p=0,203        | -0,8137 | p=0,395 | -0,1445 | p=0,908 |
| 6928+3   | 0,0763         | p=0,951        | -0,5339 | p=0,641 | -0,2495        | p=0,839        | -0,4381 | p=0,711 | 0,2285  | p=0,853 |
| Novembro |                |                |         |         |                |                |         |         |         |         |
|          | L              |                | (-) a   |         | b              |                | C       |         | (-) h   |         |
| 454+1    | 0,6001         | p=0,590        | 0,6462  | p=0,553 | -0,0452        | p=0,971        | 0,5573  | p=0,624 | -0,5351 | p=0,641 |
| 454+3    | 0,7370         | p=0,473        | 0,7258  | p=0,483 | 0,6527         | p=0,547        | 0,7714  | p=0,439 | -0,3911 | p=0,744 |
| 5054+1   | -0,7237        | p=0,485        | 0,5811  | p=0,605 | 0,2933         | p=0,810        | 0,4069  | p=0,733 | -0,7628 | p=0,448 |
| 5054+3   | -0,3940        | p=0,742        | 0,7641  | p=0,446 | -0,4213        | p=0,723        | 0,0384  | p=0,976 | -0,8938 | p=0,296 |
| 5156+1   | -0,9579        | p=0,185        | -0,9579 | p=0,185 | -0,9579        | p=0,185        | -0,9579 | p=0,185 | 0,9579  | p=0,185 |
| 5156+3   | -0,0419        | p=0,973        | 0,8692  | p=0,329 | 0,4830         | p=0,679        | 0,5769  | p=0,609 | -0,5564 | p=0,624 |
| 5453+1   | 0,3120         | p=0,798        | 0,8236  | p=0,384 | -0,8007        | p=0,409        | -0,0178 | p=0,989 | -0,9085 | p=0,275 |
| 5453+3   | -0,0995        | p=0,937        | -0,5241 | p=0,649 | -0,4622        | p=0,694        | -0,4776 | p=0,683 | 0,6001  | p=0,590 |
| 5536+1   | <b>-0,9969</b> | <b>p=0,050</b> | -0,7266 | p=0,482 | -0,9497        | p=0,203        | -0,8898 | p=0,302 | 0,4434  | p=0,708 |
| 5536+3   | 0,4632         | p=0,693        | -0,7843 | p=0,426 | 0,4599         | p=0,696        | 0,0730  | p=0,953 | 0,6919  | p=0,514 |
| 6928+1   | 0,6817         | p=0,522        | 0,3972  | p=0,740 | 0,4202         | p=0,724        | 0,4150  | p=0,728 | -0,3742 | p=0,756 |
| 6928+3   | -0,8812        | p=0,314        | -0,9940 | p=0,070 | -0,7148        | p=0,493        | -,9108  | p=0,271 | 0,8881  | p=0,304 |

Valores em negrito são significantes a  $p < 0,05$ .

Verifica-se, pela Tabela 7, uma grande variação nos valores de correlação e que estes foram, para a maioria das variáveis, negativos. Desta forma, o comportamento dos parâmetro colorimétrico teriam comportamento inverso quando correlacionados com o TCH, ou seja quanto menor os parâmetros colorimétricos maior será o TCH em forte grau de correlação entre ambas, mas ainda assim não foram significativas. Contudo os valores de  $r$  foram altos,

0,7, 0,8, 0,9, mostrando uma tendência dos parâmetros colorimétricos em correlacionarem-se com a produtividade (TCH).

Mesmo comportamento ficou evidenciado para as variáveis que apresentaram correlações significativas, ou seja, a maioria tem comportamento inverso do parâmetro colorimétrico e o TCH.

Com os dados da Tabela 8, é possível verificar o comportamento das correlações na safra 2012/13.

Tabela 8. Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2012/13.

| Var /<br>folhas | Março          |                |         |         |               |                |         |         |                |                |
|-----------------|----------------|----------------|---------|---------|---------------|----------------|---------|---------|----------------|----------------|
|                 | L              |                | (-) a   |         | b             |                | C       |         | (-) h          |                |
| 454+1           | 0,9869         | p=0,103        | 0,9816  | p=0,122 | 0,8872        | p=0,305        | 0,9150  | p=0,264 | <b>-0,9981</b> | <b>p=0,040</b> |
| 454+3           | 0,6292         | p=0,567        | 0,7598  | p=0,451 | 0,7775        | p=0,433        | 0,7752  | p=0,435 | -0,7355        | p=0,474        |
| 5054+1          | 0,8228         | p=0,385        | -0,4160 | p=0,727 | 0,5793        | p=0,607        | 0,5002  | p=0,667 | 0,8033         | p=0,406        |
| 5054+3          | 0,9061         | p=0,278        | 0,9892  | p=0,094 | 0,8581        | p=0,343        | 0,9051  | p=0,280 | 0,4578         | p=0,697        |
| 5156+1          | 0,5833         | p=0,604        | -0,9657 | p=0,167 | -0,9526       | p=0,197        | -0,9567 | p=0,188 | 0,9886         | p=0,096        |
| 5156+3          | 0,9254         | p=0,247        | -0,9028 | p=0,283 | 0,8684        | p=0,330        | -0,6298 | p=0,566 | 0,9397         | p=0,222        |
| 5453+1          | -0,8702        | p=0,328        | -0,9707 | p=0,154 | -0,9737       | p=0,146        | -0,9729 | p=0,149 | 0,9457         | p=0,211        |
| 5453+3          | -0,7076        | p=0,500        | 0,8137  | p=0,395 | -0,0665       | p=0,958        | 0,2003  | p=0,872 | -0,4464        | p=0,705        |
| 5536+1          | -0,8360        | p=0,370        | -0,7488 | p=0,461 | -0,8277       | p=0,379        | -0,8191 | p=0,389 | -0,8685        | p=0,330        |
| 5536+3          | 0,2199         | p=0,859        | 0,8135  | p=0,395 | -0,9389       | p=0,224        | -0,9898 | p=0,091 | -0,8687        | p=0,330        |
| 6928+1          | -0,8972        | p=0,291        | 0,9253  | p=0,248 | -0,9115       | p=0,270        | -0,9118 | p=0,269 | -0,9093        | p=0,273        |
| 6928+3          | -0,6738        | p=0,529        | 0,5929  | p=0,596 | 0,6760        | p=0,527        | 0,6606  | p=0,541 | 0,8880         | p=0,304        |
|                 | Junho          |                |         |         |               |                |         |         |                |                |
|                 | L              |                | (-) a   |         | b             |                | C       |         | (-) h          |                |
| 454+1           | 0,5424         | p=,635         | -0,7938 | p=0,416 | 0,3978        | p=0,740        | 0,1277  | p=0,918 | 0,8776         | p=0,318        |
| 454+3           | 0,6661         | p=0,536        | 0,0574  | p=0,963 | 0,8395        | p=0,366        | 0,9543  | p=0,193 | -0,0160        | p=0,990        |
| 5054+1          | 0,9718         | p=0,152        | 0,1761  | p=0,887 | 0,9859        | p=0,107        | 0,9405  | p=0,221 | 0,8810         | p=0,314        |
| 5054+3          | 0,2764         | p=0,822        | -0,9668 | p=0,164 | -0,0248       | p=0,984        | -0,5712 | p=0,613 | <b>0,9997</b>  | <b>p=0,016</b> |
| 5156+1          | 0,8930         | p=0,297        | 0,2309  | p=0,852 | <b>0,9988</b> | <b>p=0,031</b> | 0,9313  | p=0,237 | 0,3874         | p=0,747        |
| 5156+3          | 0,9879         | p=0,099        | 0,5488  | p=0,630 | 0,9851        | p=0,110        | 0,9830  | p=0,118 | -0,2760        | p=0,822        |
| 5453+1          | -0,9745        | p=0,144        | -0,9917 | p=0,082 | -0,4896       | p=0,674        | -0,5700 | p=0,614 | -0,0147        | p=0,991        |
| 5453+3          | 0,0542         | p=0,965        | 0,9952  | p=0,062 | -0,8786       | p=0,317        | 0,1128  | p=0,928 | <b>-0,9982</b> | <b>p=0,038</b> |
| 5536+1          | -0,7664        | p=0,444        | 0,7444  | p=0,465 | 0,1109        | p=0,929        | 0,2191  | p=0,859 | -0,3141        | p=0,797        |
| 5536+3          | 0,7082         | p=0,499        | -0,0483 | p=0,969 | 0,9962        | p=0,056        | 0,9928  | p=0,077 | 0,7553         | p=0,455        |
| 6928+1          | -0,8291        | p=0,378        | -0,3580 | p=0,767 | 0,2373        | p=0,847        | 0,1132  | p=0,928 | 0,8162         | p=0,392        |
| 6928+3          | <b>-0,9999</b> | <b>p=0,010</b> | -0,8689 | p=0,330 | -0,9443       | p=0,213        | -0,9380 | p=0,225 | -0,9719        | p=0,151        |

Tabela 8, Cont.

|        |                | Agosto         |                |                |                |                |                |                |               |                |  |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|--|
|        |                | L              |                | (-) a          |                | b              |                | C              |               | (-) h          |  |
| 454+1  | -0,8977        | p=0,291        | <b>-0,9980</b> | <b>p=0,040</b> | -0,9509        | p=0,200        | -0,9947        | p=0,065        | 0,9964        | p=0,054        |  |
| 454+3  | -0,6571        | p=0,544        | -0,3846        | p=0,749        | -0,5618        | p=0,620        | -0,5232        | p=0,649        | 0,3487        | p=0,773        |  |
| 5054+1 | -0,9904        | p=0,088        | 0,9096         | p=0,273        | 0,3618         | p=0,764        | 0,6698         | p=0,533        | -0,5112       | p=0,658        |  |
| 5054+3 | <b>-0,9997</b> | <b>p=0,016</b> | -0,4264        | p=0,720        | -0,6736        | p=0,530        | -0,6437        | p=0,555        | -0,9230       | p=0,252        |  |
| 5156+1 | 0,3945         | p=0,742        | 0,8819         | p=0,312        | 0,2317         | p=0,851        | 0,4155         | p=0,727        | -0,3469       | p=0,774        |  |
| 5156+3 | -0,8015        | p=0,408        | -0,3631        | p=0,763        | -0,7675        | p=0,443        | -0,6862        | p=0,519        | -0,5057       | p=0,662        |  |
| 5453+1 | 0,7765         | p=0,434        | -0,3812        | p=0,751        | 0,5516         | p=0,628        | 0,3720         | p=0,757        | 0,9869        | p=0,103        |  |
| 5453+3 | 0,9899         | p=0,091        | -0,9240        | p=0,250        | 0,2269         | p=0,854        | -0,3596        | p=0,766        | 0,9903        | p=0,089        |  |
| 5536+1 | -0,8362        | p=0,370        | 0,6997         | p=0,507        | <b>-0,9999</b> | <b>p=0,007</b> | -0,9555        | p=0,191        | -0,9042       | p=0,281        |  |
| 5536+3 | 0,9587         | p=0,184        | 0,7571         | p=0,453        | 0,4921         | p=0,672        | 0,9565         | p=0,188        | -0,7311       | p=0,478        |  |
| 6928+1 | -0,9029        | p=0,283        | -0,8435        | p=0,361        | -0,8297        | p=0,377        | <b>-0,9995</b> | <b>p=0,021</b> | 0,6591        | p=0,542        |  |
| 6928+3 | -0,9128        | p=0,268        | -0,7678        | p=0,443        | -0,6472        | p=0,552        | -0,6762        | p=0,527        | <b>0,9997</b> | <b>p=0,017</b> |  |
|        |                | Novembro       |                |                |                |                |                |                |               |                |  |
|        |                | L              |                | (-) a          |                | b              |                | C              |               | (-) h          |  |
| 454+1  | -0,6459        | p=0,553        | 0,0534         | p=0,966        | -0,6420        | p=0,556        | -0,5179        | p=0,653        | -0,9041       | p=0,281        |  |
| 454+3  | -0,6936        | p=0,512        | -0,1393        | p=0,911        | -0,2865        | p=0,815        | -0,2539        | p=0,837        | -0,1245       | p=0,921        |  |
| 5054+1 | -0,5114        | p=0,658        | 0,3031         | p=0,804        | 0,0826         | p=0,947        | 0,1482         | p=0,905        | -0,6137       | p=0,579        |  |
| 5054+3 | -0,9118        | p=0,269        | <b>0,9999</b>  | <b>p=0,010</b> | -0,9438        | p=0,214        | -0,9094        | p=0,273        | -0,9892       | p=0,093        |  |
| 5156+1 | -0,8715        | p=0,326        | 0,3371         | p=0,781        | -0,6538        | p=0,546        | -0,6045        | p=0,587        | -0,9077       | p=0,276        |  |
| 5156+3 | 0,9896         | p=0,092        | -0,9232        | p=0,251        | 0,5855         | p=0,602        | 0,2138         | p=0,863        | <b>0,9999</b> | <b>p=0,007</b> |  |
| 5453+1 | -0,2520        | p=0,838        | <b>0,9982</b>  | <b>p=0,038</b> | 0,3932         | p=0,743        | 0,5564         | p=0,624        | -0,5408       | p=0,636        |  |
| 5453+3 | -0,9071        | p=0,277        | <b>0,9984</b>  | <b>p=0,036</b> | 0,7995         | p=0,410        | 0,8903         | p=0,301        | -0,8952       | p=0,294        |  |
| 5536+1 | -0,1617        | p=0,897        | 0,0491         | p=0,969        | -0,4538        | p=0,700        | -0,8615        | p=0,339        | -0,1200       | p=0,923        |  |
| 5536+3 | 0,4644         | p=0,693        | -0,5629        | p=0,619        | -0,4607        | p=0,695        | -0,4933        | p=0,672        | 0,6776        | p=0,526        |  |
| 6928+1 | 0,6054         | p=0,586        | 0,1535         | p=0,902        | 0,9298         | p=0,240        | 0,8552         | p=0,347        | 0,9117        | p=0,269        |  |
| 6928+3 | 0,2786         | p=0,820        | -0,8380        | p=0,367        | 0,6602         | p=0,541        | 0,3233         | p=0,790        | <b>0,9996</b> | <b>p=0,017</b> |  |

Valores em negrito são significantes a  $p < 0,05$

Observa-se na Tabela 8, que também houve grande variação nos valores do coeficiente de *Pearson* e estes indicaram uma fraca associação entre o parâmetro colorimétrico e o TCH. Nota-se, contudo, que houve relação direta e significativa com maior expressão nesta safra, 2012/13, quando comparada a anterior, 2011/12. É possível observar ainda que na época de novembro houve uma única variedade, RB 855453 que correlacionou-se positivamente com o TCH nas duas folhas diagnósticas (+1 e +3), mas ainda sim está fora de sua época recomendada de colheita, que seria em junho. Assim como na safra 2011/12, os valores de *r* mostram uma forte tendência de se correlacionarem com o TCH.

As poucas correlações significativas quando ocorreram, não corresponderam a seus grupos de maturação, ou seja, cada variedade expressaria com mais intensidade seu potencial genético em março as precoces (RB 855156 e RB 966928), em junho/agosto as médias (RB 835054 e RB 855453) e novembro as tardias (RB 855536 e RB 72454).

#### 5.4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, não foi possível utilizar o Colorímetro digital, na escala de cor CIELAB bem como os parâmetros colorimétricos ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h^\circ$ ) para discriminar as variedades de cana-de-açúcar estudadas, suas épocas de corte e posição de suas folhas diagnósticas.

Os resultados de correlação obtidos demonstraram que os parâmetros colorimétricos utilizados não apresentaram correlação significativa com a produtividade para as variedades de cana avaliadas, sendo que nos casos em que houve correlação, estas foram na maioria, inversas. Contudo os valores de  $r$  evidenciam uma forte tendência dessa correlação.

Conclui-se também que os valores de TCH avaliados não foram bons indicativos de diferenciação entre variedade e épocas.

Colorimetricamente as variedades de cana analisada não variam no tempo nem em relação as folhas diagnósticas utilizadas pela literatura.

## 5.5. REFERÊNCIAS

- AMARANTE, C. V. T. do; STEFFENS, SANGOI, L.; ZANARDI, O.Z.; MIQUELOTO, A.; SCHWEITZER, C. Quantificação de clorofilas em folhas de milho através de métodos ópticos não destrutivos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.9, n.1, p. 39-50, 2010.
- AMARANTE, C.V.T. do; ZANARDI, O.Z.; MIQUELOTO, A.; STEFFENS, SANGOI, L.; HERHART, J.; ALMEIDA, J.A. Quantificação da área e do teor de clorofilas em folhas de plantas jovens de videira ‘cabernet sauvignon’ mediante métodos não destrutivos. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 31, n. 3, p. 680-686, Setembro 2009.
- BARROS, J. F. M. **Desdobro e caracterização tecnológica das madeiras de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para a indústria moveleira**. 2002. 54p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília.
- BRANDELERO, C; BERRA, E.F.; BACKES, K.S.; PEREIRA, R.S.; BRUN, E.J. Espectrorradiometria na região do visível e do infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 215-222, jan.-mar., 2012.
- CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:853-863, 2004.
- CASAGRANDE, A. A. 1991. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 157p.
- DEMATTÊ, J. A. M; BORTOLETTO, M. A. M; GUSTAVO M. VASQUES, G. M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.590-597, 2011
- FARIAS, M.S.S. de. **Diagnóstico da necessidade de drenagem no perímetro irrigado de São Gonçalo**. 1999. 75p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Paraíba.
- FUNBIO, Fundo Brasileiro para a Biodiversidade. **A cana-de-açúcar no Brasil**. Maio de 2010. 2p. Acesso em 12 de outubro de 2012. On line. Disponível na internet: [www.funbio.org.br](http://www.funbio.org.br).
- GAYA, LG; FERRAZ, JBS. Aspectos genético-quantitativos da qualidade da carne em frangos. **Ciência Rural**, Santa Maria. v.36, n.1, p. 439-356, 2006.
- GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. Piracicaba, ESALQ, 1997. 118p. Tese (Doutorado).
- HIRSCHLER, R.; **Colorimetria Aplicada na Indústria Têxtil**, apostila, Rio de Janeiro: FaSeC – Faculdade SENAI/CETIQT – 2002.
- HUNTERLAB. **CIE L\*a\*b\* color scale: applications note**, v.8, n.7, 1996. Acesso em 12 de outubro de 2012. On line. Disponível na internet: [http://www.hunterlab.com/color\\_theory.php](http://www.hunterlab.com/color_theory.php)
- JIMÉNEZ, A.; GUTIÉRREZ, G. Color. In: Alvarado, J. D.; Aguilera, J. M. **Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos**. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2001. p. 325-346.
- KIDMOSE, U.; EDELENBOS, R., NORBAEK; P. CHRISTENSEN, **Colour stability in vegetables**. In: Douglas B. MacDougall; **Colour in food: Improving quality**, cap. 8. Cambridge: Woodhead publishing, 378 p. 2002.

- LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo heteromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.1-12, 1996.
- MACDOUGALL, D.B., **Colour in food: improving quality**, New York: CRC Press, 2002, 366 p.
- MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 – ETM +**. 2003. 74p. Dissertação (Mestrado) Campinas, SP.
- MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992.124p.
- MARTINAZZO, A. P. **Secagem, armazenamento e qualidade de folhas de *Cymbopogon citratus* (D.C.) Stapf**. 2006. 156p. Tese (Doutorado). Viçosa, MG.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; CARNEIRO, A. P. S. Avaliação colorimétrica de folas secas de *cymbopogon citratus* (D.C.) Stapf durante o armazenamento em diferentes embalagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, p.131-140, 2008.
- MATOS, R. E.; SILVA, M. A. V.; SANTOS, P. S.; BEZERRA, A. R. G.; PINHEIRO, A. C. T.; MOSCON, E. S. **Estimativa da biomassa da soja na região oeste da Bahia utilizando o NDVI**. 5p. [www.eventweb.com.br/cbmet2012/specific-files/.../index.php?file...](http://www.eventweb.com.br/cbmet2012/specific-files/.../index.php?file...)
- MINOLTA. **Precise color communication: Color control from perception to instrumentation**. Japão: Minolta Co. Ltd., 1998.
- NANNI, M. R.; OLIVEIRA, R. **Levantamento pedológico detalhado das áreas de produção de cana industrial da cooperativa Cooperval**. Relatório Técnico. 85 p. 2009.
- RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H.; et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2: ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 233-239. (**Boletim técnico**, 100)
- RIBEIRO, S. C. A.; RIBEIRO, C. F. A.; PARK, K. J.; ARAUJO, E. A. F.; TOBINAGA, S. Alteração da cor da carne de Mapará (*Hypophthalmus edentatus*) desidratada osmoticamente e seca. **Rev. Bras. de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.9, n.2, p.125-135, 2007.
- SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M.; DELGADO, G.; DELGADO, R.; PÉREZ, M. M.; MELGOSA, M. Spectroradiometric and Visual Color Measurements of Disturbed and Undisturbed Soil Samples. **Soil Science**, Baltimore, v. 160, p.291-303, 1995.
- SHAPIRO, S. S; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n.2, 1965.
- SHIKIDA, P. F. A. A agroindústria canavieira no Paraná e seus aspectos locais: uma abordagem sobre o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. **Economia & Tecnologia - Ano 07**, Vol. 26 - Julho/Setembro de 2011. p.1-8.
- SILVA, E.M.; MARANGON, G.P.; Dessbesell, L.; Moraes, W.W.; Lippert, D.B.; Pereira, R.S. Caracterização espectral na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 285 - 292, abr./jun. 2012.
- TISOT, D. A. **Modelos de transferência radiativa no estudo da concentração de clorofila em cana-de-açúcar, utilizando dados hiperespectrais**. São José dos Campos: INPE, 2009. 112p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto).

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Application of soil physics**. New York, Academic Press, p.319-344. 1980.

WENDT, S. C. **Análise da Mudança de Cor em Concretos Submetidos a Altas Temperaturas como Indicativo de Temperaturas Alcançadas e da Degradação Térmica**. 2006. 183p. Dissertação (Mestrado) Porto Alegre: PPGE/UFRGS.

## 6. CAPÍTULO 3

### **Relação entre índices espectrais de vegetação com a produtividade e discriminação de variedades de cana-de-açúcar**

## RESUMO

A informação espectral tem boa relação com variáveis agronômicas e pode contribuir com informações para o monitoramento, acompanhamento e previsão de safras. Assim, o objetivo deste trabalho foi correlacionar a reflectância das folhas de cana-de-açúcar, através de índices de vegetação (IVs), com a produtividade, tonelada de cana por hectare (TCH) e ainda discriminar as variedades (RB 72454, RB 835054, RB 845156, RB 855453, RB 855536 e RB 966928), folhas diagnósticas (+1 e +3) e épocas de colheita (março, junho, agosto e novembro). O trabalho compreendeu a instalação de delineamento blocos ao acaso. Com a utilização de um espectrorradiômetro FieldSpec 3, foram obtidas as medidas de radiância refletida da face superior das folhas e posteriormente estes dados foram trabalhados no software ASD ViewSpec Pro. Os IVs foram RATIO, RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index). Observou-se pouca diferença estatística significativa entre os valores médios das reflectâncias (IVs) na discriminação de variedades, épocas e folhas diagnósticas da cana-de-açúcar. Comportamento similar foi a correlação dos IVs com o TCH, existindo baixa correlação entre variedades e épocas. O EVI foi o IV que mais se destacou.

Palavras-chave: Espectrorradiometria. Sensoriamento Remoto. Previsão de Safra.

## ABSTRACT

The spectrum information usually presents good relationship with agronomic variables and can contribute to monitor and predict harvest production. Therefore, the objective of the present work was to determine the potential correlation between sugarcane leaf reflectance, through vegetation index (VI), and productivity given in terms of tones per hectare (TCH). Moreover, discrimination of the varieties (RB 72454, RB 835054, RB 845156, RB 855453, RB 855536 e RB 966928), leaf diagnoses (+1 e +3) and the optimal harvest time (March, June, August and November). The development of the work consisted of setting random block delineation. Radiant reflection from the top of the leaves was measured using a FieldSpec®3 spectroradiometer, whose data was analyzed by means of the ASD ViewSpec Pro application. The chosen vegetation indexes were RATIO, RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index). Insignificant statistical difference was observed for the reflectance mean values in the discrimination of varieties, crop time and sugarcane leaf diagnoses. Likewise, the weak correlation between IVs and TCH indicated not to have strong correlation between varieties and crop time. EVI was the outstanding IV among the ones considered.

Keywords: Spectroradiometrie. Remote Sensing. Crop Forecast.

## 6.1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar é destaque no cenário agrícola brasileiro, com grande importância econômica, social e ambiental. O Brasil é o maior produtor mundial da cultura, seguido pela Índia, com metade da produção brasileira, e China (FAO, 2012) e o acompanhamento o desenvolvimento da cultura tem sido cada vez mais imprescindível para a tomada de decisões no manejo da cana-de-açúcar.

O planejamento adequado e funcional tem como ponto de partida as estimativas de safra. No setor sucroalcooleiro, é crescente a necessidade de estimativas de safra confiáveis para o planejamento adequado das unidades produtoras, frente ao mercado nacional e internacional (Benvenuti, 2005).

Com o objetivo de estudar o ambiente terrestre, o sensoriamento remoto utiliza sensores e equipamentos para registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem a superfície terrestre (Novo, 2008), entre elas, as culturas agrícolas. Através desta técnica, é possível obter informações sobre: estimativa de área plantada, produção agrícola, vigor vegetativo das culturas, além de fornecer subsídios para o planejamento agrícola nacional estadual e municipal ou ainda em nível de microbacia hidrográfica ou fazenda (Andrade, 2008).

De acordo com Jensen (2009), a utilização de técnicas de sensoriamento remoto na agricultura tem sido relatada desde a década de 60 na modelagem de vários parâmetros biofísicos da vegetação e podem ser medidos através dos índices de vegetação. Estudos já foram realizados utilizando estes índices como indicadores qualitativo e quantitativo, dentre os quais pode-se citar os trabalhos realizados por Rosendo (2005); Silva et al (2009); Ramos et al 2010; Laurentino et al (2011), entre outros.

Para Moreira e Shimabukuro (2004), um índice de vegetação resulta da combinação da medida da radiação eletromagnética refletida pela vegetação, em algumas bandas do espectro eletromagnético, que guardam certa relação com a quantidade e o estado da vegetação na área onde foi feita a medida espectral. Na região do visível a reflectância das folhas é baixa devido a maior absorção da radiação solar pela ação dos pigmentos fotossintetizantes, enquanto na região do infravermelho próximo a reflectância é alta e se deve ao espalhamento da radiação no interior das folhas em função da estrutura celular.

Segundo Ponzoni e Shimakuro (2007), existem diversos índices de vegetação propostos na literatura, objetivando explorar as propriedades espectrais da vegetação, onde

sua fundamentação reside no comportamento espectral na região do visível e do infravermelho próximo.

Para Liu (2007), os múltiplos índices de vegetação usados para monitorar e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações, usando os dados digitais de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnética possuem como objetivo, condensar as informações espectrais e discriminar o que é ou não vegetação, monitorando e avaliando as condições de crescimento das culturas, ante as ocorrências de doenças, pragas, sua alteração em relação à secas e geadas, bem como diversos eventos meteorológicos.

De todos os índices encontrados na literatura, os mais utilizados são o Índice de Razão Simples (SR) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Lira et al., 2009). Estes índices permitem identificar a presença de vegetação verde e caracterizar sua distribuição espacial, como também a evolução no decorrer do tempo (Dorigo et al., 2007; Lobato et al., 2010). Contudo nem sempre seu emprego é o que gera os melhores resultados. Por isso, outros índices precisam ser avaliados por outros sensores e para outras aplicações, para que sejam abertas novas perspectivas para a aplicação de índices de vegetação em agricultura (Pellegrino, 2001).

A utilização de dados de reflectância obtidos por meio de espectroradiômetros, permite estabelecer padrões de resposta espectral de culturas agrícolas e de metodologia para identificação e gestão dessas culturas, além da obtenção de informações para previsão de safras (Papa, 2009).

O objetivo geral desse estudo foi, portanto, avaliar o comportamento espectral da cana-de-açúcar, por meio de índices de vegetação obtidos por meio da transformação linear entre o valor espectral das diferentes bandas do sensor, gerados no seu estágio de máximo crescimento e correlacioná-los com a produtividade da cultura. Ainda, por meio da utilização desses índices, discriminar variedades e épocas de colheita da cana-de-açúcar.

## 6.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 6.2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado na área de abrangência da Cooperativa Agroindustrial Vale do Ivaí LTDA - COOPerval, sediada no município de Jandaia do Sul - PR, cuja área plantada com cana é de 16.000 ha, num raio de aproximadamente 60 km em relação ao complexo industrial. A Fazenda Santa Lúcia, no município de Bom Sucesso é, mais especificamente, onde a área experimental está situada (Figura 1), cujas coordenadas centrais são latitude  $23^{\circ}43'37''\text{S}$  e a longitude  $51^{\circ}46'54''$ . A altitude é de 542 m.

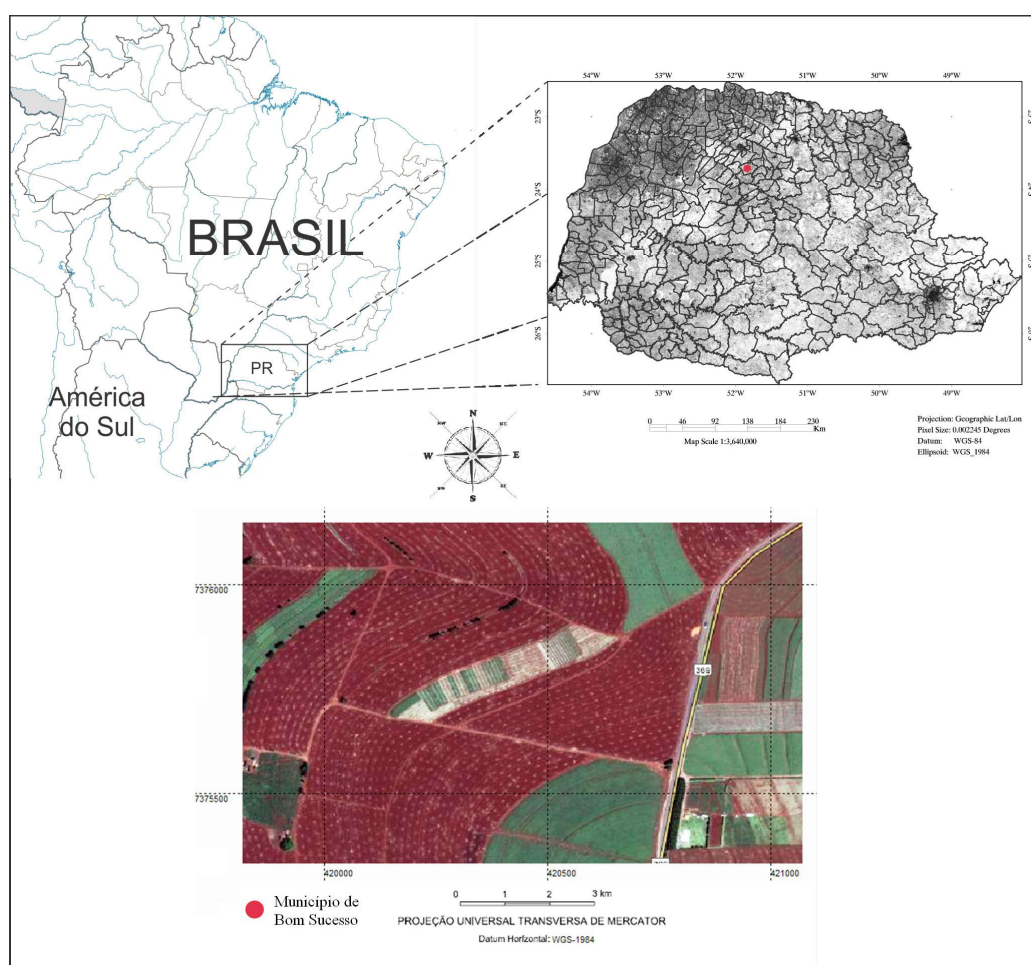


Figura 1. Área experimental na Fazenda Santa Lúcia.

O clima da região é o tropical de altitude, tipo Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, subtropical ou temperado úmido, sem estação seca e de verão longo e quente. Ocorrem de zero a três geadas noturnas por ano. A precipitação é superior a  $1.400 \text{ mm ano}^{-1}$ .

De acordo com Nanni e Oliveira (2009), o solo predominante na área foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico.

A área experimental foi composta por quatro épocas de colheita (março, junho, agosto e novembro), seis diferentes variedades de cana-de-açúcar (RB 72454, RB 835054, RB 845156, RB 855453, RB 855536 e RB 966928) e duas posições de folhas (+1 e +3) que foram repetidas e distribuídas, aleatoriamente, em 3 blocos, resultando num total de 72 parcelas (Figura 3a). Cada parcela era composta por 4 linhas, chamadas sulcos, de 6 m de comprimento e espaçadas em 1,40 m uma da outra (Figura 3b). As duas linhas externas são chamadas de borda e as duas centrais correspondem a área útil da parcela. O trabalho foi realizado em duas safras agrícolas (2011/2012 e 2012/2013), onde o método aplicado à coleta de dados foi sendo aperfeiçoado e adaptado às condições do estudo de acordo com as análises preliminares bem como com a disponibilidade de recursos.

### **6.2.2. Amostragem**

O início das campanhas de campo para aquisição das informações relativas as variáveis biométricas da cana-de-açúcar e coleta das folhas, ocorreu em março de 2011.

Visando uma aplicação mais ampla do método desenvolvido no trabalho, optou-se por realizá-lo em cana-soca, já que no ciclo de vida total de um canavial a cana-soca é predominante. Nessa condição, o ciclo anual da cultura se completa em 12 meses, em média, o que facilita as análises comparativas da resposta espectral entre os diversos cortes da cana-soca. O trabalho foi realizado em duas safras agrícolas (2011/2012 e 2012/2013), onde o método aplicado à coleta de dados foi sendo aperfeiçoado e adaptado às condições do estudo de acordo com os resultados obtidos e a disponibilidade de recursos.

Como citado por Casagrande (1991), as folhas foram numeradas pelo sistema de Kuijper (Figura 2). As coletas das folhas ocorreram no início da segunda quinzena de cada época. Como existem divergências na literatura de qual folha usar (folha diagnóstico), a avaliação foi definida pela amostragem em dez plantas por parcela por época, coletando dez folhas +1 (Raij e Cantarella, 1997), como também, dez folhas +3 (Malavolta, 1992). Assim, Um total de 180 plantas por campanha de campo foram amostradas nas parcelas experimentais, resultando em 360 folhas, 180 folhas +1 e 180 folhas +3.

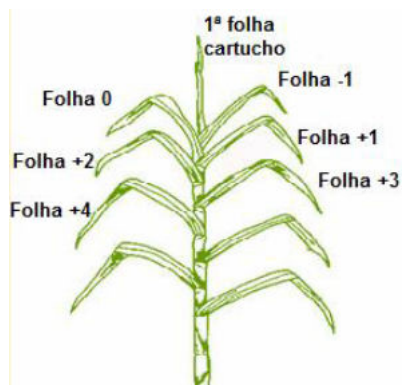


Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper (Casagrande, 1991).

No procedimento de coleta, dividiu-se a folha em três partes, cortando a parte central com aproximadamente 0,30 m. As folhas foram identificadas, separadas em sacos plásticos e acondicionadas em câmaras úmidas com temperaturas reduzidas para evitar-se a degradação das mesmas antes de serem encaminhadas ao laboratório e armazenadas no refrigerador até o momento das leituras (Tisot, 2009; Brandelero et al., 2012; Silva et al., 2012).

### 6.2.3. Produtividade da cana-de-açúcar

As avaliações de produtividade foram realizadas nas duas linhas centrais de cada parcela experimental. Em cada época de colheita, foi obtida a massa (kg), com balança eletrônica, graduada em 50 g (Figura 3c). A produtividade de cana (tonelada de cana por hectare - TCH), em  $\text{Mg ha}^{-1}$ , foi calculada por meio da massa de 30 colmos industrializáveis por parcela. Foram somadas à massa final as massas de cada feixe retirado para avaliação da qualidade tecnológica.

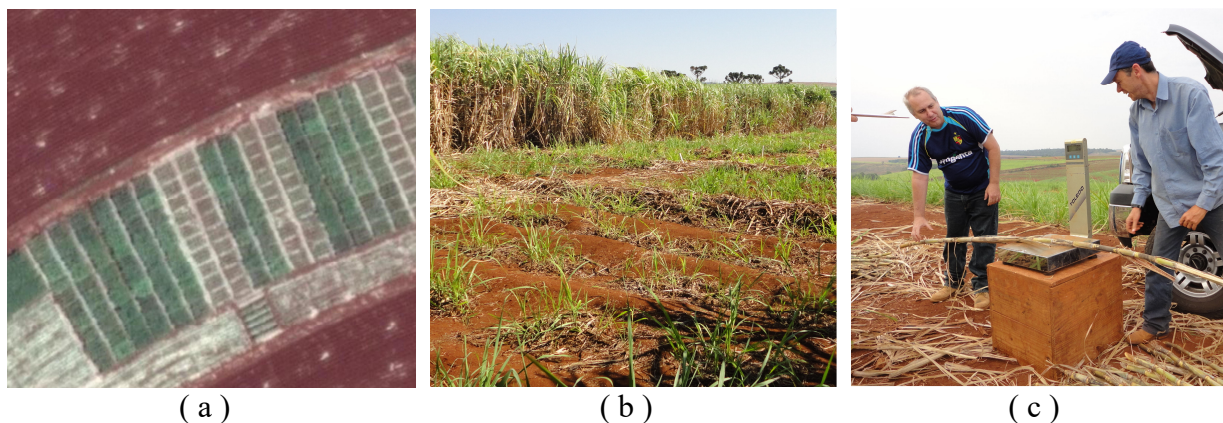


Figura 3. Área experimental ( a ); Parcelas ( b ); Pesagem dos colmos da cana-de-açúcar ( c ).

#### 6.2.4. Obtenção dos dados radiométricos em laboratório (Espectrorradiometria)

A leitura espectral foi realizada num total de 360 folhas (180 folhas +1 e 180 folhas +3). Estas foram, uma a uma, dispostas sobre um cubo de madeira (0,15 m de altura x 0,20 m de lado) utilizado como base, revestido em preto fosco. Uma manta de borracha, também preta e fosca, foi usada sobre as folhas, com abertura de 0,10 m de lado, para deixá-las totalmente abertas. Em cada folha foram coletados quatro espectros, e para a análise estatística, estabeleceu-se a leitura média das quatro medidas espectrais.

Para aquisição dos dados espectrais das folhas em laboratório, foi utilizada a metodologia estabelecida por Abdel-Rahman et al. (2008).

Em ambiente devidamente preparado (Figura 4), foram realizadas as leituras a partir do espectrorradiômetro FieldSpec 3 JR, marca ASD, o qual realiza medidas espectrais na faixa de 350 nm a 2500 nm. O intervalo de amostragem é de 1,4 nm na faixa de 350 nm a 1050 nm e de 2 nm na faixa de 1000 nm a 2500 nm. Sua resolução espectral é de 3 nm na faixa espectral de 350 nm a 700 nm e de 30 nm na faixa de 1400 nm a 2100 nm. O equipamento foi programado para realizar 50 leituras por amostra, gerando a curva espectral média de cada amostra de folha analisada.



Figura 4. FieldSpec 3 JR em ambiente de trabalho.

A geometria de aquisição dos dados, conforme definido por Nanni e Demattê (2006), utilizou-se de placa padrão branca com 100% de reflectância. O leitor de fibra óptica foi colocado em posição vertical de 0,08 m de distância da plataforma de apoio para amostras. A área de leitura foi de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>. A fonte de iluminação utilizada foi composta por um spot marca Mako, contendo cooler para resfriamento do sistema e fixado em tripé apropriado, e lâmpada halógena de 650 W para iluminação das amostras, com feixe não colimado para o plano visado, posicionada a 0,35 m da plataforma e com um ângulo de 30° em relação ao plano horizontal. (Figura 5).

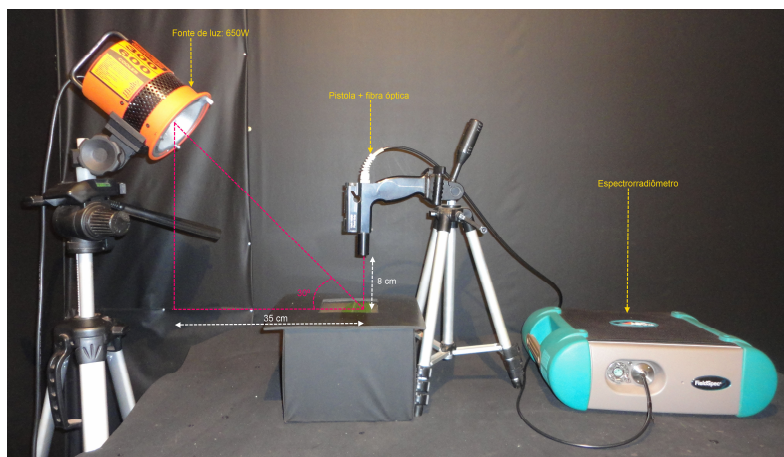


Figura 5. Geometria utilizada na aquisição dos dados de laboratório.

Assim, foi obtido o fator de reflectância bidirecional espectral, que expressa a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de um corpo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, sob as mesmas condições de iluminação e geometria de leitura (Nicodemus et al., 1977).

Para cada folha amostrada, foram realizadas quatro leituras ao longo da mesma. A resposta espectral de cada amostra, utilizada para a análise estatística e discussão deste trabalho, refere-se à média das quatro leituras, assim como realizado por Nanni (2000), Fiorio et al. (2010) e Cezar (2012).

#### 6.2.5. Índices de Vegetação

Para representar a resposta espectral da biomassa da cultura da cana-de-açúcar e avaliar a sua correlação com a produtividade, foram utilizadas bandas referentes a faixa do visível ao infravermelho próximo (IVP), e os seguintes índices de vegetação: RATIO, RVI, NDVI, GNDVI e EVI. Todos os índices calculados neste item baseiam-se em valores de refletância.

Moreira (2000) cita que os primeiros trabalhos (Jordan, 1969; Pearson e Miller, 1972) iniciaram com a utilização da razão simples entre bandas, no caso do infravermelho próximo (IVP) e vermelho (V) originando os índices de vegetação RATIO e RVI, atribuído por Eastman (1999) a Richardson e Wiegand (1977), e dados pelas equações (1) e (2) respectivamente, onde se observava melhor correlação com a biomassa, realçando a resposta da vegetação.

$$RATIO = \frac{IVP}{V} \quad (\text{eq. 1})$$

$$RVI = \frac{V}{IVP} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde IVP: infravermelho próximo e V: vermelho.

Como esses índices são dispostos em forma de razão, não aceitam a divisão por zero. Assim, Rouse et al. (1973 e 1974) propuseram o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que apresenta a vantagem de minimizar efeitos topográficos ao produzir uma escala linear de medida, que é dado pela diferença entre as bandas IVP e V normalizada, ou dividida, pela soma dessas duas bandas e ainda possui a propriedade de variar entre -1 a +1 (quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal), o 0 representa valor aproximado para ausência de vegetação, ou seja, representa superfícies não vegetadas (Epiphanyo et al., 1996; Rosa, 2007; Eastman, 1998), conforme equação 3:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (\text{eq. 3})$$

Entre os índices utilizados por Gitelson et al. (1996), é importante citar o índice de vegetação diferença normalizada verde (“Green”NDVI) dado pela equação 4. Neste estudo este índice será representado pela sigla GNDVI.

$$GNDVI = \frac{IVP - VD}{IVP + VD} \quad (\text{eq. 4})$$

Em que VD: verde.

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação verde, melhorando a sensibilidade para as variações estruturais e arquitetônicas do dossel de fitofisionomias, com maior densidade de biomassa em relação ao NDVI e reduzindo as influências atmosféricas bem como a influência do solo (Huete et al., 2002). O EVI pode ser obtido a partir da equação 5:

$$EVI = G \frac{IVP - V}{IVP + C_1 \times V - C_2 \times A + L} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde: L é o fator de ajuste para o solo; G é o fator de ganho e  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera nas faixas do azul e vermelho do espectro eletromagnético. Os valores dos coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são:  $L=1$ ,  $C_1=6$ ,  $C_2=7,5$  e  $G=2,5$  (Huete et al., 1997; Justice et al., 1998; Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

#### 6.2.6. Análises estatísticas

Antes da aplicação dos testes estatísticos, verificou-se a normalidade dos conjuntos de dados (premissa para escolha do teste a ser aplicado) por meio do teste W, apresentado em Shapiro e Wilk (1965).

Os índices de vegetação (IVs), foram analisados por procedimentos de análise estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão da média, valor máximo e valor mínimo), utilizando-se o pacote estatístico STATISTICA versão 10 (Statsoft, 2010). Também foram determinados os quartis superiores (QS), quartis inferiores (QI) e a amplitude interquartis (AI), necessários para avaliar se dados periféricos podem ser considerados candidatos a “outliers” (Libardi et al., 1996; Gonçalves, 1997).

$$AI = QS - QI \quad (\text{eq. 1})$$

Os limites, inferior (LI) e superior (LS), para a caracterização de dados de comportamento possivelmente atípico, foram definidos pelas equações:

$$LI = QI - 1,5 * AI \quad (\text{eq. 2})$$

$$LS = QS + 1,5 * AI \quad (\text{eq. 2})$$

Nos casos em que os parâmetros estudados apresentaram valores discrepantes (“outliers”), esses foram descartados e, nessas situações, foram aplicados novamente os procedimentos da análise descritiva sem os valores discrepantes.

Em seguida foi realizada análise exploratória dos dados, premissa inicial para verificar e descrever as medidas estatísticas e matemáticas dos dados, o que melhora a eficiência da análise estatística (Farias, 1999). Após isto, os dados para cada variedade nas quatro épocas de colheita, foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas por meio do teste estatístico de *Tukey*, considerando 95% de confiança, no pacote estatístico ASSISTAT Versão 7.6 beta (2012).

Posteriormente foi montada a matriz de correlação de *Pearson*, identificando as correlações significativas entre os parâmetros colorimétricos e a produção, no programa STATISTICA 10.

### 6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados da análise exploratória, dos índices de vegetação, após remoção dos valores externos aos limites inferior e superior, apresentando os parâmetros estatísticos referentes às medidas de tendência central e dispersão.

Tabela 1. Estatística descritiva dos índices de vegetação para as safras 2011/12 e 2012/13.

| Parâmetro estatístico | 454+1  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 2011   |       |       |       |       | 2012  |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,438  | 2,317 | 0,393 | 0,433 | 0,386 | 0,437 | 2,322 | 0,394 | 0,434 | 0,387 |
| Mediana               | 0,444  | 2,252 | 0,385 | 0,434 | 0,376 | 0,440 | 2,275 | 0,389 | 0,435 | 0,381 |
| CV                    | 0,119  | 0,124 | 0,129 | 0,103 | 0,160 | 0,117 | 0,121 | 0,126 | 0,103 | 0,151 |
| Desvio padrão         | 0,052  | 0,286 | 0,050 | 0,044 | 0,061 | 0,051 | 0,279 | 0,050 | 0,044 | 0,058 |
|                       | 454+3  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,470  | 2,166 | 0,363 | 0,427 | 0,348 | 0,459 | 2,215 | 0,373 | 0,441 | 0,354 |
| Mediana               | 0,473  | 2,116 | 0,358 | 0,424 | 0,345 | 0,456 | 2,192 | 0,373 | 0,445 | 0,347 |
| CV                    | 0,131  | 0,134 | 0,157 | 0,132 | 0,164 | 0,132 | 0,132 | 0,152 | 0,148 | 0,154 |
| Desvio padrão         | 0,061  | 0,288 | 0,057 | 0,056 | 0,057 | 0,061 | 0,292 | 0,057 | 0,065 | 0,054 |
|                       | 5054+1 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,379  | 2,673 | 0,452 | 0,445 | 0,416 | 0,370 | 2,744 | 0,462 | 0,451 | 0,431 |
| Mediana               | 0,376  | 2,661 | 0,454 | 0,445 | 0,418 | 0,362 | 2,765 | 0,469 | 0,454 | 0,428 |
| CV                    | 0,118  | 0,110 | 0,102 | 0,089 | 0,091 | 0,127 | 0,120 | 0,106 | 0,091 | 0,107 |
| Desvio padrão         | 0,045  | 0,293 | 0,046 | 0,039 | 0,037 | 0,047 | 0,329 | 0,049 | 0,041 | 0,046 |
|                       | 5054+3 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,402  | 2,524 | 0,428 | 0,452 | 0,391 | 0,388 | 2,626 | 0,443 | 0,456 | 0,412 |
| Mediana               | 0,398  | 2,514 | 0,431 | 0,451 | 0,390 | 0,385 | 2,594 | 0,444 | 0,461 | 0,410 |
| CV                    | 0,122  | 0,120 | 0,115 | 0,109 | 0,111 | 0,136 | 0,133 | 0,122 | 0,103 | 0,133 |
| Desvio padrão         | 0,049  | 0,301 | 0,049 | 0,049 | 0,043 | 0,052 | 0,348 | 0,054 | 0,047 | 0,055 |
|                       | 5156+1 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,417  | 2,440 | 0,414 | 0,405 | 0,395 | 0,408 | 2,491 | 0,422 | 0,410 | 0,410 |
| Mediana               | 0,415  | 2,409 | 0,413 | 0,397 | 0,399 | 0,408 | 2,450 | 0,420 | 0,403 | 0,414 |
| CV                    | 0,131  | 0,131 | 0,130 | 0,108 | 0,145 | 0,133 | 0,133 | 0,129 | 0,105 | 0,145 |
| Desvio padrão         | 0,054  | 0,318 | 0,054 | 0,044 | 0,057 | 0,054 | 0,329 | 0,054 | 0,043 | 0,059 |
|                       | 5156+3 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,434  | 2,351 | 0,397 | 0,403 | 0,384 | 0,421 | 2,426 | 0,410 | 0,412 | 0,400 |
| Mediana               | 0,420  | 2,380 | 0,408 | 0,402 | 0,386 | 0,417 | 2,396 | 0,411 | 0,416 | 0,402 |
| CV                    | 0,144  | 0,142 | 0,151 | 0,131 | 0,148 | 0,151 | 0,149 | 0,152 | 0,128 | 0,153 |
| Desvio padrão         | 0,062  | 0,332 | 0,060 | 0,052 | 0,057 | 0,063 | 0,359 | 0,062 | 0,052 | 0,061 |
|                       | 5453+1 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                       | RVI    | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   | RVI   | RATIO | NDVI  | GNDVI | EVI   |
| Média                 | 0,455  | 2,239 | 0,377 | 0,372 | 0,378 | 0,443 | 2,299 | 0,388 | 0,380 | 0,396 |
| Mediana               | 0,450  | 2,225 | 0,380 | 0,375 | 0,382 | 0,437 | 2,288 | 0,392 | 0,386 | 0,398 |
| CV                    | 0,133  | 0,135 | 0,151 | 0,130 | 0,139 | 0,138 | 0,137 | 0,150 | 0,130 | 0,151 |
| Desvio padrão         | 0,060  | 0,302 | 0,057 | 0,048 | 0,052 | 0,061 | 0,313 | 0,058 | 0,049 | 0,059 |

Tabela 1, Cont.

| 5453+3        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Média         | 0,486 | 2,086 | 0,348 | 0,363 | 0,346 | 0,463 | 2,208 | 0,370 | 0,382 | 0,372 |
| Mediana       | 0,483 | 2,072 | 0,349 | 0,360 | 0,352 | 0,461 | 2,167 | 0,369 | 0,374 | 0,364 |
| CV            | 0,120 | 0,120 | 0,151 | 0,136 | 0,147 | 0,147 | 0,150 | 0,172 | 0,156 | 0,176 |
| Desvio padrão | 0,058 | 0,249 | 0,052 | 0,049 | 0,051 | 0,068 | 0,331 | 0,064 | 0,060 | 0,065 |
| 5536+1        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Média         | 0,422 | 2,414 | 0,409 | 0,406 | 0,428 | 0,418 | 2,437 | 0,412 | 0,408 | 0,434 |
| Mediana       | 0,418 | 2,390 | 0,410 | 0,405 | 0,430 | 0,415 | 2,408 | 0,413 | 0,410 | 0,437 |
| CV            | 0,137 | 0,140 | 0,140 | 0,116 | 0,118 | 0,138 | 0,142 | 0,139 | 0,117 | 0,122 |
| Desvio padrão | 0,058 | 0,337 | 0,057 | 0,047 | 0,050 | 0,057 | 0,345 | 0,057 | 0,047 | 0,053 |
| 5536+3        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Média         | 0,459 | 2,221 | 0,374 | 0,402 | 0,384 | 0,448 | 2,283 | 0,384 | 0,411 | 0,391 |
| Mediana       | 0,460 | 2,172 | 0,370 | 0,395 | 0,391 | 0,446 | 2,242 | 0,383 | 0,400 | 0,396 |
| CV            | 0,137 | 0,137 | 0,157 | 0,127 | 0,150 | 0,150 | 0,154 | 0,167 | 0,146 | 0,152 |
| Desvio padrão | 0,062 | 0,304 | 0,058 | 0,051 | 0,057 | 0,067 | 0,350 | 0,064 | 0,060 | 0,059 |
| 6928+1        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Média         | 0,373 | 2,728 | 0,458 | 0,443 | 0,442 | 0,364 | 2,802 | 0,468 | 0,449 | 0,454 |
| Mediana       | 0,362 | 2,759 | 0,468 | 0,446 | 0,449 | 0,355 | 2,820 | 0,476 | 0,450 | 0,464 |
| CV            | 0,138 | 0,136 | 0,118 | 0,101 | 0,123 | 0,143 | 0,139 | 0,118 | 0,100 | 0,121 |
| Desvio padrão | 0,051 | 0,369 | 0,054 | 0,044 | 0,054 | 0,052 | 0,387 | 0,055 | 0,045 | 0,055 |
| 6928+3        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Média         | 0,375 | 2,714 | 0,456 | 0,452 | 0,439 | 0,365 | 2,796 | 0,467 | 0,459 | 0,454 |
| Mediana       | 0,369 | 2,707 | 0,461 | 0,454 | 0,443 | 0,361 | 2,768 | 0,469 | 0,460 | 0,453 |
| CV            | 0,138 | 0,135 | 0,118 | 0,096 | 0,119 | 0,144 | 0,141 | 0,119 | 0,097 | 0,121 |
| Desvio padrão | 0,052 | 0,365 | 0,054 | 0,043 | 0,052 | 0,052 | 0,392 | 0,055 | 0,044 | 0,055 |

CV: Coeficiente de Variação.

RVI (Ratio Vegetation Index), RATIO (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

Como observa-se na Tabela 1, os valores médios do coeficiente de variação (CV) para os índices de vegetação avaliados foram baixos, segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2002), com exceção do RATIO, que comportou-se com alta variação. Tais valores verificam que as condições do experimento foram bem controladas, uma vez que se trata de experimento em campo aberto. A medida estatística CV permite, assim, comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes (Zanzarini et al., 2013).

A proximidade entre os valores da média e mediana indica que os índices de vegetação (IVs) apresentam distribuição aproximadamente simétrica e normal para todas as variedades, o que foi também confirmado pelo teste W. Já o RATIO não apresentou distribuição normal. Isso pode ser devido a uma maior reflectância e transmitância no visível (400-700 nm) e baixa reflectância e transmitância no infravermelho próximo (NOH et al., 2005), causando alterações nos valores de RATIO.

Percebe-se ainda, resultados maiores para a safra 2011/12 comparativamente a 2012/13. Este comportamento provavelmente é devido ao fato de que na safra 2011/12 ter

ocorrido maior volume de chuvas que na safra 2012/13 com isso ocorreu um incremento de massa verde que provoca o aumento dos valores de IVs mensurados com o sensor. Observa-se também que os valores dos IVs foram todos positivos e maiores que zero indicando que, mesmo no ano com menor volume de chuva, ainda sim as folhas apresentavam-se “viçosas”.

Tabela 2. Valores médios dos índices de vegetação RATIO, RVI, NDVI, GNDVI e EVI da cana-de-açúcar nas quatro épocas para os anos safras 2011/12 e 2012/13.

| Var. /<br>folhas | 2011   |      |        |       |        |      |          |       | 2012   |      |        |        |        |      |          |       |
|------------------|--------|------|--------|-------|--------|------|----------|-------|--------|------|--------|--------|--------|------|----------|-------|
|                  | Março  |      | Junho  |       | Agosto |      | Novembro |       | Março  |      | Junho  |        | Agosto |      | Novembro |       |
|                  | RATIO  |      |        |       |        |      |          |       |        |      |        |        |        |      |          |       |
| 454+1            | 2,3365 | Ac   | 2,1844 | Acd   | 2,2438 | Aa   | 2,5232   | Aabcd | 2,1638 | Abc  | 2,1844 | Acde   | 2,2438 | Aab  | 2,5232   | Aabc  |
| 454+3            | 2,3631 | Ac   | 2,0282 | Ad    | 2,1162 | Aa   | 2,3541   | Aabcd | 1,9804 | Bc   | 2,0282 | Acde   | 2,1162 | Aab  | 2,3541   | Aabc  |
| 5054+1           | 2,9584 | Aab  | 2,7648 | Aab   | 2,5928 | Aa   | 2,6602   | Aabc  | 2,6398 | Aa   | 2,7648 | Aab    | 2,5928 | Aa   | 2,6602   | Aabc  |
| 5054+3           | 2,9314 | Aab  | 2,5571 | ABabc | 2,4973 | Ba   | 2,5187   | Babcd | 2,3923 | Aabc | 2,5571 | Aabc   | 2,4973 | Aab  | 2,5187   | Aabc  |
| 5156+1           | 2,6442 | Aabc | 2,5160 | Aabcd | 2,2823 | Aa   | 2,5230   | Aabcd | 2,4421 | Aab  | 2,5160 | Aabcd  | 2,2823 | Aab  | 2,5230   | Aabc  |
| 5156+3           | 2,6519 | Aabc | 2,4283 | Aabcd | 2,3205 | Aa   | 2,3042   | Abcd  | 2,3497 | Aabc | 2,4283 | Aabcde | 2,3205 | Aab  | 2,3042   | Acd   |
| 5453+1           | 2,4799 | Abc  | 2,2203 | Acd   | 2,1964 | Aa   | 2,3010   | Acd   | 2,2654 | Aabc | 2,2203 | Acde   | 2,1964 | Aab  | 2,3010   | Acd   |
| 5453+3           | 2,5722 | Aabc | 2,0969 | Bcd   | 2,1255 | Ba   | 2,0356   | Bd    | 2,1479 | Abc  | 2,0969 | Ade    | 2,1255 | Ab   | 2,0356   | Ad    |
| 5536+1           | 2,5055 | Abc  | 2,3115 | Abcd  | 2,3293 | Aa   | 2,6014   | Aabc  | 2,2526 | Aabc | 2,3115 | Abcde  | 2,3293 | Aab  | 2,6014   | Aabc  |
| 5536+3           | 2,4706 | Abc  | 2,1924 | Acd   | 2,1000 | Aa   | 2,3692   | Aabcd | 2,2146 | Aabc | 2,1924 | Acde   | 2,1000 | Ab   | 2,3692   | Aabcd |
| 6928+1           | 3,0217 | Aa   | 2,8324 | ABa   | 2,5449 | Ba   | 2,8080   | ABab  | 2,6627 | Aa   | 2,8324 | Aa     | 2,5449 | Aab  | 2,8080   | Aab   |
| 6928+3           | 3,0439 | Aa   | 2,7268 | ABab  | 2,5919 | Ba   | 2,8219   | ABa   | 2,6457 | Aa   | 2,7268 | Aab    | 2,5919 | Aa   | 2,8219   | Aa    |
| RVI              |        |      |        |       |        |      |          |       |        |      |        |        |        |      |          |       |
| 454+1            | 0,4333 | Aa   | 0,4605 | Aab   | 0,4531 | Aabc | 0,4000   | Ab    | 0,4333 | Aa   | 0,4605 | Aab    | 0,4531 | Aabc | 0,4000   | Ab    |
| 454+3            | 0,4281 | Aab  | 0,4970 | Aa    | 0,4812 | Aab  | 0,4309   | Aab   | 0,4281 | Aab  | 0,4970 | Aa     | 0,4812 | Aab  | 0,4309   | Aab   |
| 5054+1           | 0,3427 | Abc  | 0,3636 | Ad    | 0,3923 | Ac   | 0,3812   | Ab    | 0,3427 | Abc  | 0,3636 | Ad     | 0,3923 | Ac   | 0,3812   | Ab    |
| 5054+3           | 0,3448 | Abc  | 0,3947 | Abcd  | 0,4064 | Aabc | 0,4046   | Ab    | 0,3448 | Abc  | 0,3947 | Abcd   | 0,4064 | Aabc | 0,4046   | Ab    |
| 5156+1           | 0,3835 | Aabc | 0,4006 | Abcd  | 0,4487 | Aabc | 0,4009   | Ab    | 0,3835 | Aabc | 0,4006 | Abcd   | 0,4487 | Aabc | 0,4009   | Ab    |
| 5156+3           | 0,3836 | Aabc | 0,4160 | Aabcd | 0,4416 | Aabc | 0,4442   | Ab    | 0,3836 | Aabc | 0,4160 | Aabcd  | 0,4416 | Aabc | 0,4442   | Aab   |
| 5453+1           | 0,4086 | Aabc | 0,4561 | Aabc  | 0,4650 | Aabc | 0,4426   | Aab   | 0,4086 | Aabc | 0,4561 | Aabc   | 0,4650 | Aabc | 0,4426   | Aab   |
| 5453+3           | 0,3931 | Babc | 0,4804 | Aab   | 0,4786 | Aabc | 0,4997   | Aa    | 0,3931 | Babc | 0,4804 | Aab    | 0,4786 | Aabc | 0,4997   | Aa    |
| 5536+1           | 0,4070 | Aabc | 0,4358 | Aabcd | 0,4387 | Aabc | 0,3921   | Ab    | 0,4070 | Aabc | 0,4348 | Aabcd  | 0,4387 | Aabc | 0,3921   | Ab    |
| 5536+3           | 0,4161 | Babc | 0,4587 | ABab  | 0,4876 | Aa   | 0,4299   | ABab  | 0,4161 | Babc | 0,4587 | ABab   | 0,4876 | Aa   | 0,4299   | ABab  |
| 6928+1           | 0,3359 | Ac   | 0,3551 | Ad    | 0,4021 | Aabc | 0,3628   | Ab    | 0,3359 | Ac   | 0,3551 | Ad     | 0,4021 | Aabc | 0,3628   | Ab    |
| 6928+3           | 0,3335 | Ac   | 0,3699 | Acd   | 0,3960 | Abc  | 0,3602   | Ab    | 0,3335 | Ac   | 0,3699 | Acd    | 0,3960 | Abc  | 0,3602   | Ab    |

Tabela 2, Cont.

|        | 2011   |     |        |       |        |       |          |      | 2012   |      |        |        |        |        |          |       |
|--------|--------|-----|--------|-------|--------|-------|----------|------|--------|------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|
|        | Março  |     | Junho  |       | Agosto |       | Novembro |      | Março  |      | Junho  |        | Agosto |        | Novembro |       |
| NDVI   |        |     |        |       |        |       |          |      |        |      |        |        |        |        |          |       |
| 454+1  | 0,3970 | Ab  | 0,3701 | Abc   | 0,3785 | Aab   | 0,4296   | Aa   | 0,3664 | Abc  | 0,3701 | Acde   | 0,3785 | Aabc   | 0,4296   | Aab   |
| 454+3  | 0,4019 | Ab  | 0,3372 | Ac    | 0,3528 | Aab   | 0,3996   | Aab  | 0,3281 | Bc   | 0,3372 | ABe    | 0,3528 | ABbc   | 0,3996   | Aabc  |
| 5054+1 | 0,4909 | Aa  | 0,4673 | Aa    | 0,4384 | Aa    | 0,4497   | Aa   | 0,4488 | Aa   | 0,4673 | Aab    | 0,4384 | Aa     | 0,4497   | Aab   |
| 5054+3 | 0,4883 | Aa  | 0,4350 | Aab   | 0,4239 | Aab   | 0,4262   | Aa   | 0,4079 | Aabc | 0,4350 | Aabc   | 0,4239 | Aabc   | 0,4262   | Aab   |
| 5156+1 | 0,4471 | Aab | 0,4289 | Aab   | 0,3834 | Aab   | 0,4289   | Aa   | 0,4161 | Aab  | 0,4289 | Aabcd  | 0,3834 | Aabc   | 0,4289   | Aab   |
| 5156+3 | 0,4474 | Aab | 0,4136 | Aabc  | 0,3904 | Aab   | 0,3879   | Aab  | 0,3992 | Aabc | 0,4136 | Aabcde | 0,3904 | Aabc   | 0,3879   | Abc   |
| 5453+1 | 0,4215 | Aab | 0,3750 | Abc   | 0,3681 | Aab   | 0,3888   | Aab  | 0,3856 | Aabc | 0,3750 | Acde   | 0,3681 | Aabc   | 0,3888   | Abc   |
| 5453+3 | 0,4369 | Aab | 0,3519 | Bbc   | 0,3551 | Bab   | 0,3361   | Bb   | 0,3644 | Abc  | 0,3519 | Ade    | 0,3551 | Abc    | 0,3361   | Ac    |
| 5536+1 | 0,4237 | Aab | 0,3939 | Aabc  | 0,3929 | Aab   | 0,4390   | Aa   | 0,3835 | Aabc | 0,3939 | Abcde  | 0,3929 | Aabc   | 0,4390   | Aab   |
| 5536+3 | 0,4157 | Aab | 0,3718 | Abc   | 0,3478 | Ab    | 0,4010   | Aab  | 0,3722 | Aabc | 0,3718 | Acde   | 0,3478 | Ac     | 0,4010   | Aabc  |
| 6928+1 | 0,4986 | Aa  | 0,4765 | Aa    | 0,4289 | Aab   | 0,4695   | Aa   | 0,4521 | Aa   | 0,4765 | Aa     | 0,4289 | Aab    | 0,4695   | Aa    |
| 6928+3 | 0,5013 | Aa  | 0,4609 | Aa    | 0,4356 | Aa    | 0,4721   | Aa   | 0,4489 | Aa   | 0,4609 | Aab    | 0,4356 | Aa     | 0,4721   | Aa    |
| GNDVI  |        |     |        |       |        |       |          |      |        |      |        |        |        |        |          |       |
| 454+1  | 0,4368 | Aa  | 0,4491 | Aab   | 0,4263 | Aabc  | 0,424    | Aab  | 0,3791 | Ba   | 0,4491 | Aab    | 0,4263 | ABabcd | 0,4240   | ABabc |
| 454+3  | 0,4824 | Aa  | 0,4306 | ABabc | 0,4345 | ABabc | 0,4151   | Bab  | 0,3963 | Aa   | 0,4306 | Aabc   | 0,4345 | Aabcd  | 0,4151   | Aabc  |
| 5054+1 | 0,4672 | Aa  | 0,4569 | Aab   | 0,4466 | Aabc  | 0,4318   | Aab  | 0,4292 | Aa   | 0,4569 | Aab    | 0,4466 | Aabc   | 0,4318   | Aabc  |
| 5054+3 | 0,4705 | Aa  | 0,4653 | Aa    | 0,4687 | Aa    | 0,4206   | Aab  | 0,4061 | Ba   | 0,4653 | Aa     | 0,4687 | Aa     | 0,4206   | ABabc |
| 5156+1 | 0,4268 | Aa  | 0,4092 | Aabc  | 0,3984 | Aabc  | 0,4063   | Aabc | 0,4004 | Aa   | 0,4092 | Aabc   | 0,3984 | Abcd   | 0,4063   | Aabc  |
| 5156+3 | 0,4362 | Aa  | 0,4106 | Aabc  | 0,4161 | Aabc  | 0,3838   | Aabc | 0,4078 | Aa   | 0,4106 | Aabc   | 0,4161 | Aabcd  | 0,3838   | Abcd  |
| 5453+1 | 0,4062 | Aa  | 0,3698 | Ac    | 0,3755 | Ac    | 0,3700   | Abc  | 0,3698 | Aa   | 0,3698 | Ac     | 0,3755 | Ad     | 0,3700   | Ac    |
| 5453+3 | 0,4392 | Aa  | 0,3717 | Bc    | 0,3853 | ABbc  | 0,3325   | Bc   | 0,3594 | Aa   | 0,3717 | Ac     | 0,3853 | Ac     | 0,3325   | Ad    |
| 5536+1 | 0,4159 | Aa  | 0,3886 | Abc   | 0,4062 | Aabc  | 0,4229   | Bc   | 0,3804 | Aa   | 0,3886 | Abc    | 0,4062 | Aabcd  | 0,4229   | Aabc  |
| 5536+3 | 0,4394 | Aa  | 0,4009 | Aabc  | 0,4134 | Aabc  | 0,3914   | Aabc | 0,3881 | Aa   | 0,4009 | Aabc   | 0,4134 | Aabcd  | 0,3914   | Aabcd |
| 6928+1 | 0,4681 | Aa  | 0,4510 | Aab   | 0,4285 | Aabc  | 0,4492   | Aa   | 0,4221 | Aa   | 0,4510 | Aab    | 0,4285 | Aabcd  | 0,4492   | Aab   |
| 6928+3 | 0,4798 | Aa  | 0,4427 | Aabc  | 0,4564 | Aab   | 0,458    | Aa   | 0,4237 | Aa   | 0,4427 | Aab    | 0,4564 | Aab    | 0,4580   | Aa    |

Tabela 2, Cont.

|        | 2011/12      |              |            |             | 2012/13    |              |             |              |
|--------|--------------|--------------|------------|-------------|------------|--------------|-------------|--------------|
|        | Março        | Junho        | Agosto     | Novembro    | Março      | Junho        | Agosto      | Novembro     |
|        | EVI          |              |            |             |            |              |             |              |
| 454+1  | 0,3909 Bcd   | 0,3476 Bcd   | 0,3626 Bab | 0,4479 Aa   | 0,3900 Bab | 0,3476 Bcd   | 0,3626 Bab  | 0,4479 Aab   |
| 454+3  | 0,3729 ABd   | 0,3205 Bd    | 0,3243 Bb  | 0,3986 Aab  | 0,3269 Bb  | 0,3205 Bd    | 0,0324 Bb   | 0,3986 Aabc  |
| 5054+1 | 0,4769 Aab   | 0,4359 ABab  | 0,4071 Ba  | 0,4039 Bab  | 0,4344 Aa  | 0,4359 Aab   | 0,4071 Aa   | 0,4039 Aabc  |
| 5054+3 | 0,4742 Aab   | 0,4025 Babc  | 0,3753 Bab | 0,3944 Bab  | 0,4187 Aa  | 0,4025 Aabc  | 0,3753 Aab  | 0,3944 Aabc  |
| 5156+1 | 0,4550 Aabc  | 0,4236 Aab   | 0,3591 Bab | 0,4020 ABab | 0,4220 Aa  | 0,4236 Aab   | 0,3591 Bab  | 0,4020 ABabc |
| 5156+3 | 0,4496 Aabc  | 0,4091 ABabc | 0,3757 Bab | 0,3670 Bbc  | 0,3884 Aab | 0,4091 Aabc  | 0,3757 Aab  | 0,3670 Acd   |
| 5453+1 | 0,4497 Aabc  | 0,3917 Bbcd  | 0,3542 Bab | 0,3871 Bc   | 0,4121 Aa  | 0,3917 ABbc  | 0,3542 Bab  | 0,3871 ABbcd |
| 5453+3 | 0,4495 Aabc  | 0,3685 Bbcd  | 0,3479 Bab | 0,3227 Bc   | 0,3989 Aa  | 0,3685 ABbcd | 0,3479 ABab | 0,3227 Bd    |
| 5536+1 | 0,4512 ABabc | 0,4304 ABab  | 0,3971 Ba  | 0,4575 Ab   | 0,4198 ABa | 0,4304 ABab  | 0,3971 Ba   | 0,4575 Aa    |
| 5536+3 | 0,4112 ABcd  | 0,3948 ABbc  | 0,3426 Bab | 0,4151 Aab  | 0,4008 Aa  | 0,3948 ABbc  | 0,3426 Bab  | 0,4151 Aabc  |
| 6928+1 | 0,4913 Aa    | 0,4701 Aa    | 0,4086 Ba  | 0,4459 Aba  | 0,4398 Aba | 0,4701 Aa    | 0,4086 Ba   | 0,4459 ABab  |
| 6928+3 | 0,4966 Aa    | 0,4676 Aba   | 0,4101 Ca  | 0,4401 Bca  | 0,4468 Aba | 0,4676 Aa    | 0,4101 Ba   | 0,4401 ABab  |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

RVI (Ratio Vegetation Index), RATIO (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

A influência das variedades nas leituras dos IVs pode ser observada, na Tabela 2, quando se analisa o comportamento das médias dos IVs obtido pelo sensor, para uma mesma época e a alteração destes ao longo dos demais períodos de leitura.

Jensen (2000) relata que os valores de NDVI oscilam de -1 a +1. Sendo que os mais próximos de 1, indicam que a vegetação apresenta-se em seu estágio denso, úmida e bem desenvolvida. Observa-se que os valores médios situaram-se mais próximos a +1, indicando que a cultura estava em estágio desenvolvido, corroborando com o observado no campo. Também os demais IVs, aqui estudados, com exceção do RATIO, tiveram seus valores oscilando próximos a +1, com comportamento similar ao NDVI. É notado ainda que o comportamento dos IVs, de forma geral, apresenta-se com maiores valores na safra 2011/12 comparativamente a safra 2012/13. Isto provavelmente foi devido a maior precipitação ocorrida na primeira safra com 1698 mm contra 1433 mm na segunda safra.

Firmino (2009), objetivando estimar IV por um período e analisar a relação desse índice com a precipitação da região em estudo, observou diminuição do IV para a região em estudo quando a precipitação diminuiu e vice versa.

Em plantas estressadas há um decréscimo na absorção pela clorofila, diminuindo também a reflectância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células da planta, e esse decréscimo leva a aumento na reflectância no vermelho (Ayala-Sila et al., 2005).

Pode-se comprovar que as variedades de cana-de-açúcar estudadas, apesar de apresentarem mesmo comportamento temporal de IVs, apresentam poucas diferenças na resposta espectral e, assim, não puderam ser estratificadas. Portanto, mais estudos com este tipo de sensor devem ser desenvolvidos incluindo, na análise do comportamento espectral novas variáveis físicas e químicas, para que se possa entender melhor o comportamento espectral da cana-de-açúcar tendo em vista a sua utilização na discriminação de variedades.

Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é sua rápida saturação que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento, ou seja, o índice estabiliza em um patamar apresentando um mesmo valor, embora com o aumento da densidade do dossel (Zanzarini et al. 2013).

De acordo com Huete (1996), um índice de vegetação ideal deve ser capaz de responder a sutis variações no estado fenológico da vegetação, independentemente da situação temporal ou espacial, e não pode sofrer fortes influências por variações de classes de solo, na geometria de iluminação e visada e nas condições atmosféricas. Percebe-se, na Tabela 2, que entre os IVs estudados, o EVI foi o que melhor diferenciou variedades/folhas e épocas.

Provavelmente isto é devido a sua formulação pois, de acordo com Reusch (1997) e Moreira (2005), observa-se que entre 400 e 500 nm, que corresponde ao azul no espectro, a reflectância é baixa, havendo aumento significativo entre 500 e 600 nm, que corresponde à reflectância na cor verde. Já entre 600 e 700 nm há declínio na reflectância sendo que essa região, ainda na faixa correspondente ao visível, refere-se à região do vermelho. Aproximadamente aos 700 nm tem-se um aumento abrupto de reflectância da cultura que equivale à transição da faixa do visível para o infravermelho, mais especificamente do vermelho, para o infravermelho próximo.

Portanto como o EVI é composto por dois componentes com baixa reflectância, isto pode ter contribuído para uma maior sensibilidade na diferenciação das variedades/folhas e épocas de colheita. A cultura da cana-de-açúcar tende a apresentar queda nos valores do EVI ao longo do período de seca (Xavier et al., 2006).

Contudo, em todas as épocas de leituras, pelo menos uma variedade/folha apresentou diferença significativa, indicando que a variedade de cana-de-açúcar interfere no valor dos IVs obtidos pelo sensor.

Pontes et al. (2005), utilizando sensoriamento remoto orbital para cana-de-açúcar, observaram que no início do ciclo vegetativo a diferença entre os valores de NDVI não foi expressiva. A saturação do NDVI ocorreu imediatamente após o período das chuvas, onde a diferença entre talhões que apresentaram maior e menor biomassa foi mais perceptível. Após esse período de saturação, correspondente à senescência das plantas e maior concentração de açúcar, não existiu diferença significativa de valores de NDVI. O valor máximo de NDVI corresponde ao pico do ciclo vegetativo da cultura. De acordo com os resultados destes autores, o comportamento expressado pelos IVs neste trabalho, a cultura não estaria em seu pico vegetativo, ou seja, não deveria ser colhida.

Trabalhos mais recentes estão apontando que índices de vegetação que fazem uso de comprimentos de onda situados na região do visível para o infravermelho próximo (REIP) possuem melhor capacidade de estimar nitrogênio e biomassa na cultura (Heege et al., 2008; Mokhehe e Ahmed, 2010). REIP (red edge inflection point) região de transição do V para o IVP com uma mudança abrupta, onde então a absorbância diminui drasticamente e a reflectância aumenta na proporção inversa (Reusch, 1997; apud Portz, 2011). Partindo desta interpretação, a aplicação deste índice, nos dados aqui obtidos pode então haver uma melhoria nos resultados, para tal precisa ser investigado.

Trabalho recente comparando mais de 10 índices de vegetação com vistas a estimar nitrogênio e biomassa aponta melhores resultados para os índices fazendo uso de

comprimentos de onda situados no REIP comparados com aqueles que utilizam dados de refletância oriundos da região do visível no espectro (Strenner, 2010).

Nesta pesquisa, trabalhou-se com um grande número de informações em conjunto como variedades, folhas e épocas e produção mas nem sempre os IVs expressaram diferenças observadas no campo. Sugerindo que novas investigações deveriam ser conduzidas a fim de corroborar os resultados, ou não.

Tabela 3. Valores médios de tonelada de cana por hectare (TCH) para o ano safra 2011/12 e 2012/13.

| Variedades /<br>folhas | 2011/12    |             |            |           | 2012/13   |            |            |            |
|------------------------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|                        | Março      | Junho       | Agosto     | Novembro  | Março     | Junho      | Agosto     | Novembro   |
| 454+1                  | 69,40 Bab  | 103,81 ABc  | 115,06 Aa  | 63,12 Bb  | 45,01 Ab  | 71,79 Ab   | 67,80 Ac   | 42,17 Ac   |
| 454+3                  | 69,40 Bab  | 103,81 ABc  | 115,06 Aa  | 63,12 Bb  | 45,01 Ab  | 71,79 Ab   | 67,80 Ac   | 42,17 Ac   |
| 5054+1                 | 93,63 ABab | 124,37 Abc  | 108,56 Aa  | 64,25 Bb  | 58,88 Aab | 84,76 Aab  | 86,73 Abc  | 56,75 Aabc |
| 5054+3                 | 93,63 ABab | 124,37 Abc  | 108,56 Aa  | 64,25 Bb  | 58,88 Aab | 84,76 Aab  | 86,73 Abc  | 56,75 Aabc |
| 5156+1                 | 88,96 Bab  | 143,96 Aabc | 111,16 ABa | 76,13 Bab | 39,17 Cb  | 89,65 Aab  | 78,79 ABbc | 47,44 BCbc |
| 5156+3                 | 88,96 Bab  | 143,96 Aabc | 111,16 ABa | 76,13 Bab | 39,17 Cb  | 89,65 Aab  | 78,79 ABbc | 47,44 BCbc |
| 5453+1                 | 62,72 Bb   | 154,86 Aab  | 96,84 Ba   | 85,23 Bab | 43,00 Bb  | 87,08 Aab  | 77,92 Abc  | 45,52 Bbc  |
| 5453+3                 | 82,72 Bb   | 154,86 Aab  | 96,84 Ba   | 85,23 Bab | 43,00 Bb  | 87,08 Aab  | 77,92 Abc  | 45,52 Bbc  |
| 5536+1                 | 118,09 Ba  | 190,39 Aa   | 137,92 Ba  | 115,98 Ba | 88,43 Aa  | 100,96 Aab | 101,43 Aab | 76,31 Aab  |
| 5536+3                 | 118,09 Ba  | 190,39 Aa   | 137,92 Ba  | 115,98 Ba | 88,43 Aa  | 100,96 Aab | 101,43 Aab | 76,31 Aab  |
| 6928+1                 | 85,32 Bab  | 148,66 Aabc | 135,68 Aa  | 92,76 Bab | 56,97 Cab | 106,07 ABa | 124,85 Aa  | 89,64 Ba   |
| 6928+3                 | 85,32 Bab  | 148,66 Aabc | 135,68 Aa  | 92,76 Bab | 56,97 Cab | 106,07 ABa | 124,85 Aa  | 89,64 Ba   |

As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si para época e médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

Conforme apresentado na Tabela 3, constatou-se a interferência das safras nos valores do TCH para as variedades e épocas de colheita. Como discutido anteriormente, isto é devido provavelmente a oscilação dos índices pluviométricos ocorridos na área de estudos, sendo maior em 2011/12 e menor em 2012/13. Embora não apresentado, verificou-se diferença significativa entre os anos para valores de TCH.

Quanto às épocas de colheita, aquelas ocorridas nos meses de junho e agosto foram as que mais produziram, para todas as seis variedades estudadas, e isto nas duas safras acompanhadas. Este comportamento era esperado apenas para as variedades intermediárias, no caso a RB 835054 e RB 855453 (PMGCA, 2008). A época com menor produtividade foi novembro, também para as duas safras, mesmo para as variedades tardias como a RB 72454 e a RB 855536 (PMGCA, 2008).

Analisando os resultados do TCH e dos IVs, nota-se que variedades com menor produtividade tiveram também menores índices, como a RB 72454 (+1 e +3) safras 2011/12 e 2012/13. Já as com valores mais elevados de TCH, o IV não acompanhou esta alta, como a RB 855536 (+1 e +3) safras 2011/12 e 2012/13.

Os coeficientes de correlação linear simples entre os índices de vegetação e a produtividade (TCH) são apresentados na Tabela 4, safra 2011/12 e na Tabela 5, safra 2012/13.

Tabela 4. Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2011/12.

| Var. /<br>folhas | Março   |         |         |         |         |        |         |        |               |                |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------------|----------------|
|                  | RVI     |         | RATIO   |         | NDVI    |        | GNDVI   |        | EVI           |                |
| 454+1            | -0,6642 | p=0,538 | 0,6108  | p=0,582 | 0,6485  | p=,551 | 0,8409  | p=,364 | 0,3596        | p=0,766        |
| 454+3            | -0,5135 | p=0,657 | 0,4861  | p=0,677 | 0,5053  | p=,663 | -0,1822 | p=,883 | 0,7508        | p=0,459        |
| 5054+1           | -0,9020 | p=0,284 | 0,9089  | p=0,274 | 0,9037  | p=,282 | 0,5092  | p=,660 | 0,9854        | p=0,109        |
| 5054+3           | -0,1097 | p=0,930 | 0,0769  | p=0,951 | 0,1011  | p=,936 | 0,2024  | p=,870 | -0,2487       | p=0,840        |
| 5156+1           | -0,6637 | p=0,538 | 0,6973  | p=0,509 | 0,6725  | p=,530 | 0,6606  | p=,541 | 0,3937        | p=0,742        |
| 5156+3           | -0,6704 | p=0,532 | 0,6920  | p=0,513 | 0,6760  | p=,527 | 0,4276  | p=,719 | 0,7035        | p=0,503        |
| 5453+1           | 0,6930  | p=0,513 | -0,6985 | p=0,508 | -0,6944 | p=,511 | -0,6943 | p=,511 | -0,6713       | p=0,531        |
| 5453+3           | 0,6932  | p=0,512 | -0,7387 | p=0,471 | -0,7065 | p=,501 | -0,7426 | p=,467 | -0,9337       | p=0,233        |
| 5536+1           | -0,9523 | p=0,197 | 0,9840  | p=0,114 | 0,9624  | p=,175 | 0,9759  | p=,140 | 0,9634        | p=0,173        |
| 5536+3           | -0,9002 | p=0,287 | 0,9295  | p=0,240 | 0,9092  | p=,273 | 0,6915  | p=,514 | 0,5861        | p=0,601        |
| 6928+1           | -0,9616 | p=0,177 | 0,9368  | p=0,227 | 0,9563  | p=,189 | 0,9304  | p=,239 | <b>0,9998</b> | <b>p=0,013</b> |
| 6928+3           | -0,6461 | p=0,553 | 0,6450  | p=0,554 | 0,6458  | p=,553 | 0,6737  | p=,529 | -0,6387       | p=0,559        |

Tabela 4, Cont.

| Var. /<br>folhas | Junho    |         |         |         |         |         |                |                |                |                |
|------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | RVI      |         | RATIO   |         | NDVI    |         | GNDVI          |                | EVI            |                |
| 454+1            | -0,9773  | p=0,136 | 0,9858  | p=0,108 | 0,9801  | p=0,127 | 0,9739         | p=0,146        | 0,9157         | p=0,263        |
| 454+3            | -0,5764  | p=0,609 | 0,5538  | p=0,626 | 0,5691  | p=0,615 | 0,9963         | p=0,055        | 0,2166         | p=0,861        |
| 5054+1           | 0,5367   | p=0,639 | -0,5294 | p=0,645 | -0,5349 | p=0,641 | <b>-0,9998</b> | <b>p=0,012</b> | <b>0,9981</b>  | <b>p=0,039</b> |
| 5054+3           | 0,4620   | p=0,694 | -0,5145 | p=0,656 | -0,4771 | p=0,683 | -0,1466        | p=0,906        | -0,6284        | p=0,567        |
| 5156+1           | 0,6220   | p=0,573 | -0,6093 | p=0,583 | -0,6185 | p=0,575 | -0,6567        | p=0,544        | -0,9444        | p=0,213        |
| 5156+3           | 0,9956   | p=0,060 | -0,9946 | p=0,066 | -0,9953 | p=0,062 | -0,8405        | p=0,364        | -0,6430        | p=0,555        |
| 5453+1           | 0,9117   | p=0,270 | -0,9284 | p=0,242 | -0,9168 | p=0,262 | -0,8942        | p=0,296        | -0,7902        | p=0,420        |
| 5453+3           | 0,9823   | p=0,120 | -0,9769 | p=0,137 | -0,9805 | p=0,126 | -0,9857        | p=0,108        | <b>-0,9997</b> | <b>p=0,015</b> |
| 5536+1           | 0,4223   | p=0,722 | -0,3856 | p=0,748 | -0,4122 | p=0,730 | -0,5708        | p=0,613        | -0,8171        | p=0,391        |
| 5536+3           | 0,5203   | p=0,652 | -0,5403 | p=0,637 | -0,5262 | p=0,647 | -0,1900        | p=0,878        | -0,8994        | p=0,288        |
| 6928+1           | -0,2708  | p=0,825 | 0,2503  | p=0,839 | 0,2658  | p=0,829 | 0,2220         | p=0,858        | 0,5406         | p=0,636        |
| 6928+3           | 0,7157   | p=0,492 | -0,6769 | p=0,527 | -0,7047 | p=0,502 | -0,9431        | p=0,216        | -0,7156        | p=0,492        |
|                  | Agosto   |         |         |         |         |         |                |                |                |                |
|                  | RVI      |         | RATIO   |         | NDVI    |         | GNDVI          |                | EVI            |                |
| 454+1            | 0,9808   | p=0,125 | -0,9841 | p=0,114 | -0,9820 | p=0,121 | -0,9326        | p=0,235        | -0,9545        | p=0,193        |
| 454+3            | 0,9920   | p=0,080 | -0,9969 | p=0,050 | -0,9939 | p=0,070 | -0,9169        | p=0,261        | -0,9647        | p=0,170        |
| 5054+1           | 0,6173   | p=0,576 | -0,6085 | p=0,584 | -0,6148 | p=0,578 | -0,7178        | p=0,490        | 0,6272         | p=0,568        |
| 5054+3           | -0,8274  | p=0,380 | 0,8692  | p=0,329 | 0,8398  | p=0,365 | 0,5163         | p=0,655        | <b>0,9993</b>  | <b>p=0,024</b> |
| 5156+1           | 0,9084   | p=0,275 | -0,8974 | p=0,291 | -0,9052 | p=0,279 | -0,8480        | p=0,356        | -0,6998        | p=0,507        |
| 5156+3           | 0,3957   | p=0,741 | -0,3466 | p=0,775 | -0,3812 | p=0,751 | -0,3306        | p=0,785        | -0,8829        | p=0,311        |
| 5453+1           | -0,5205  | p=0,651 | 0,6024  | p=0,588 | 0,5458  | p=0,632 | 0,2792         | p=0,820        | 0,4532         | p=0,701        |
| 5453+3           | -0,9587  | p=0,183 | 0,9612  | p=0,178 | 0,9596  | p=0,182 | 0,6144         | p=0,579        | <b>1,0000</b>  | <b>p=0,001</b> |
| 5536+1           | 0,4999   | p=0,667 | -0,3993 | p=0,739 | -0,4683 | p=0,690 | -0,1685        | p=0,892        | -0,5723        | p=0,612        |
| 5536+3           | 0,2429   | p=0,844 | -0,1960 | p=0,874 | -0,2268 | p=0,854 | -0,4212        | p=0,723        | 0,0806         | p=0,949        |
| 6928+1           | 0,9889   | p=0,095 | -0,9912 | p=0,085 | -0,9896 | p=0,092 | -0,9809        | p=0,124        | -0,9118        | p=0,269        |
| 6928+3           | 0,9904   | p=0,088 | -0,9951 | p=0,063 | -0,9920 | p=0,080 | -0,9861        | p=0,106        | -0,3931        | p=0,743        |
|                  | Novembro |         |         |         |         |         |                |                |                |                |
|                  | RVI      |         | RATIO   |         | NDVI    |         | GNDVI          |                | EVI            |                |
| 454+1            | -0,4559  | p=0,699 | 0,4264  | p=0,720 | 0,4472  | p=0,705 | 0,5350         | p=0,641        | 0,6310         | p=0,565        |
| 454+3            | -0,9612  | p=0,178 | 0,9359  | p=0,229 | 0,9540  | p=0,194 | 0,9744         | p=0,144        | 0,8697         | p=0,329        |
| 5054+1           | 0,2294   | p=0,853 | -0,2507 | p=0,839 | -0,2352 | p=0,849 | -0,5035        | p=0,664        | 0,4144         | p=0,728        |
| 5054+3           | 0,2202   | p=0,859 | -0,2901 | p=0,813 | -0,2413 | p=0,845 | -0,2083        | p=0,866        | -0,3453        | p=0,776        |
| 5156+1           | 0,8240   | p=0,383 | -0,8048 | p=0,405 | -0,8189 | p=0,389 | -0,9176        | p=0,260        | -0,7444        | p=0,465        |
| 5156+3           | -0,2822  | p=0,818 | 0,2954  | p=0,809 | 0,2857  | p=0,816 | 0,1364         | p=0,913        | 0,2330         | p=0,850        |
| 5453+1           | -0,6971  | p=0,509 | 0,6805  | p=0,524 | 0,6917  | p=0,514 | 0,7892         | p=0,421        | 0,3946         | p=0,742        |
| 5453+3           | -0,8286  | p=0,378 | 0,8197  | p=0,388 | 0,8254  | p=0,382 | 0,8662         | p=0,333        | 0,4279         | p=0,719        |
| 5536+1           | -0,9602  | p=0,180 | 0,9635  | p=0,173 | 0,9611  | p=0,178 | 0,9658         | p=0,167        | -0,1554        | p=0,901        |
| 5536+3           | 0,2414   | p=0,845 | -0,2504 | p=0,839 | -0,2438 | p=0,843 | -0,1580        | p=0,899        | 0,8816         | p=0,313        |
| 6928+1           | 0,8845   | p=0,309 | -0,8632 | p=0,337 | -0,8795 | p=0,316 | 0,2797         | p=0,820        | <b>-0,9998</b> | <b>p=0,013</b> |
| 6928+3           | 0,9562   | p=0,189 | -0,9453 | p=0,212 | -0,9536 | p=0,195 | <b>-1,0000</b> | <b>p=0,004</b> | -0,6583        | p=0,543        |

Valores em negrito são significantes a  $p < 0,05$ .

RVI (Ratio Vegetation Index), RATIO (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

A análise de correlação linear de *Pearson* entre os índices de vegetação e a produção da cana-de-açúcar (TCH) está apresentada na Tabela 4. Observa-se que o RATIO, RVI e NDVI não apresentaram correlação significativa com nenhuma das épocas para a safra 2011/12. O GNDVI apresentou correlação significativa em duas variedades/folhas, RB 835054+1 em junho e a RB 966928+3 em novembro, e ambas de forma inversa, ou seja, maior o índice menor será o TCH. Já o EVI apresentou tanto correlações negativas quanto positivas, com predomínio desta última chegando a 100% para a variedade/folha RB 855453+3. Em todas as épocas o EVI mostrou correlações entre variedade/folha e TCH, mas pelo total de tratamentos, somente cinco correlações tiveram significância estatística, um número baixo pelo total de correspondências, demonstrando que o sensor não foi capaz de detectar diferença de produção entre as variedades de cana e os índices da leitura de refletância tiveram comportamento aleatório tanto entre variedades/folha quanto nas épocas. Apesar disto, o  $r^2$  tendeu a fortes correlações indicando que pode ser possível esta análise.

A Tabela 5 exibe os resultados de correlação de *Pearson* e variedades/folhas nas épocas para a safra 2012/13.

Tabela 5. Coeficiente de correlação de *Pearson* entre os parâmetros colorimétricos e TCH das variedades de cana-de-açúcar para as épocas de março, junho, agosto e novembro do ano safra 2012/13.

| Var. /<br>folhas | Março   |         |         |         |         |        |                |                |         |         |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|----------------|----------------|---------|---------|
|                  | RVI     |         | RATIO   |         | NDVI    |        | GNDVI          |                | EVI     |         |
| 454+1            | 0,1100  | p=0,930 | -0,1047 | p=0,933 | -0,1083 | p=,931 | 0,0465         | p=0,970        | 0,4577  | p=0,697 |
| 454+3            | -0,7806 | p=0,430 | 0,7815  | p=0,429 | 0,7809  | p=,430 | 0,8961         | p=0,293        | -0,2218 | p=0,858 |
| 5054+1           | -0,6237 | p=0,571 | 0,6442  | p=0,554 | 0,6296  | p=,566 | 0,3596         | p=0,766        | 0,6336  | p=0,563 |
| 5054+3           | -0,8373 | p=0,368 | 0,8381  | p=0,367 | 0,8375  | p=,368 | -0,4601        | p=0,696        | 0,9793  | p=0,130 |
| 5156+1           | 0,9682  | p=0,161 | -0,9717 | p=0,152 | -0,9692 | p=,158 | -0,9249        | p=0,248        | -0,7375 | p=0,472 |
| 5156+3           | -0,4784 | p=0,682 | 0,5538  | p=0,626 | 0,5034  | p=,664 | 0,4250         | p=0,721        | 0,6243  | p=0,571 |
| 5453+1           | 0,8745  | p=0,322 | -0,8759 | p=0,321 | -0,8750 | p=,322 | -0,8765        | p=0,320        | -0,9306 | p=0,239 |
| 5453+3           | 0,3700  | p=0,759 | -0,3831 | p=0,750 | -0,3741 | p=,756 | -0,3655        | p=0,762        | 0,7064  | p=0,501 |
| 5536+1           | -0,8362 | p=0,370 | 0,8380  | p=0,367 | 0,8367  | p=,369 | <b>-0,9977</b> | <b>p=0,043</b> | 0,8897  | p=0,302 |
| 5536+3           | -0,9153 | p=0,264 | 0,9025  | p=0,283 | 0,9110  | p=,271 | 0,8950         | p=0,294        | 0,9285  | p=0,242 |
| 6928+1           | 0,5917  | p=0,597 | -0,5721 | p=0,612 | -0,5862 | p=,601 | -0,3998        | p=0,738        | 0,6564  | p=0,544 |
| 6928+3           | 0,7398  | p=0,470 | -0,7500 | p=0,460 | -0,7425 | p=,467 | -0,4794        | p=0,682        | 0,2085  | p=0,866 |

Tabela 5, Cont.

| Var. /<br>folhas | Junho          |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | RVI            |                | RATIO          |                | NDVI           |                | GNDVI          |                | EVI            |                |
| 454+1            | -0,4330        | p=0,715        | 0,3923         | p=0,743        | 0,4205         | p=0,724        | 0,4466         | p=0,705        | 0,6033         | p=0,588        |
| 454+3            | -0,9286        | p=0,242        | 0,9384         | p=0,225        | 0,9319         | p=0,236        | 0,1479         | p=0,905        | <b>0,9999</b>  | <b>p=0,010</b> |
| 5054+1           | -0,4810        | p=0,681        | 0,4885         | p=0,675        | 0,4829         | p=0,679        | -0,4976        | p=0,668        | 0,4267         | p=0,719        |
| 5054+3           | <b>0,9998</b>  | <b>p=0,014</b> | <b>-0,9993</b> | <b>p=0,024</b> | <b>-1,0000</b> | <b>p=0,003</b> | -0,9375        | p=0,226        | -0,9844        | p=0,113        |
| 5156+1           | -0,7449        | p=0,465        | 0,7555         | p=0,455        | 0,7479         | p=0,462        | 0,7140         | p=0,494        | 0,2725         | p=0,824        |
| 5156+3           | 0,1529         | p=0,902        | -0,1627        | p=0,896        | -0,1557        | p=0,900        | -0,5905        | p=0,598        | 0,7265         | p=0,482        |
| 5453+1           | 0,9834         | p=0,116        | -0,9902        | p=0,089        | -0,9856        | p=0,108        | -0,9751        | p=0,142        | -0,9135        | p=0,267        |
| 5453+3           | 0,9094         | p=0,273        | -0,8977        | p=0,290        | -0,9055        | p=0,279        | <b>-0,9975</b> | <b>p=0,045</b> | -0,9652        | p=0,168        |
| 5536+1           | 0,8460         | p=0,358        | -0,8239        | p=0,384        | -0,8400        | p=0,365        | -0,9246        | p=0,249        | <b>-0,9991</b> | <b>p=0,027</b> |
| 5536+3           | -0,0252        | p=0,984        | 0,0016         | p=0,999        | 0,0183         | p=0,988        | 0,3721         | p=0,757        | -0,5192        | p=0,652        |
| 6928+1           | 0,8368         | p=0,369        | -0,8249        | p=0,382        | -0,8339        | p=0,372        | -0,8081        | p=0,401        | -0,9604        | p=0,180        |
| 6928+3           | <b>-0,9984</b> | <b>p=0,036</b> | 0,9939         | p=0,070        | <b>0,9974</b>  | <b>p=0,046</b> | 0,9293         | p=0,241        | <b>0,9984</b>  | <b>p=0,036</b> |
|                  | Agosto         |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|                  | RVI            |                | RATIO          |                | NDVI           |                | GNDVI          |                | EVI            |                |
| 454+1            | 0,3529         | p=0,770        | -0,3695        | p=0,759        | -0,3587        | p=0,766        | -0,7995        | p=0,410        | -0,2515        | p=0,838        |
| 454+3            | 0,6314         | p=0,565        | -0,5941        | p=0,595        | -0,6188        | p=0,575        | -0,1460        | p=0,907        | -0,7336        | p=0,476        |
| 5054+1           | 0,7463         | p=0,464        | -0,7389        | p=0,471        | -0,7442        | p=0,466        | -0,8293        | p=0,377        | 0,4801         | p=0,681        |
| 5054+3           | -0,9135        | p=0,267        | 0,9428         | p=0,216        | 0,9223         | p=0,253        | 0,6592         | p=0,542        | 0,9771         | p=0,136        |
| 5156+1           | 0,7456         | p=0,464        | -0,7625        | p=0,448        | -0,7507        | p=0,459        | -0,8242        | p=0,383        | -0,9341        | p=0,232        |
| 5156+3           | -0,6844        | p=0,520        | 0,7220         | p=0,486        | 0,6958         | p=0,510        | 0,7337         | p=0,476        | 0,0785         | p=0,950        |
| 5453+1           | -0,7149        | p=0,493        | 0,7806         | p=0,430        | 0,7355         | p=0,474        | 0,5073         | p=0,661        | 0,6590         | p=0,542        |
| 5453+3           | <b>-0,9992</b> | <b>p=0,025</b> | <b>0,9995</b>  | <b>p=0,019</b> | <b>0,9993</b>  | <b>p=0,023</b> | 0,7899         | p=0,420        | 0,9697         | p=0,157        |
| 5536+1           | -0,3244        | p=0,790        | 0,4287         | p=0,718        | 0,3583         | p=0,767        | 0,6323         | p=0,564        | 0,2421         | p=0,844        |
| 5536+3           | -0,5716        | p=0,613        | 0,6104         | p=0,582        | 0,5851         | p=0,602        | 0,4069         | p=0,733        | 0,8043         | p=0,405        |
| 6928+1           | -0,9226        | p=0,252        | 0,9289         | p=0,242        | 0,9244         | p=0,249        | 0,9038         | p=0,282        | 0,7839         | p=0,426        |
| 6928+3           | -0,9942        | p=0,069        | 0,9891         | p=0,094        | 0,9928         | p=0,077        | 0,9156         | p=0,263        | 0,6057         | p=0,586        |
|                  | Novembro       |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|                  | RVI            |                | RATIO          |                | NDVI           |                | GNDVI          |                | EVI            |                |
| 454+1            | 0,2261         | p=0,855        | -0,2581        | p=0,834        | -0,2357        | p=0,849        | -0,1366        | p=0,913        | 0,9827         | p=0,119        |
| 454+3            | -0,9123        | p=0,269        | 0,9423         | p=0,217        | 0,9222         | p=0,253        | 0,5991         | p=0,591        | 0,9829         | p=0,118        |
| 5054+1           | 0,0224         | p=0,986        | -0,0444        | p=0,972        | -0,0285        | p=0,982        | -0,6718        | p=0,531        | 0,5942         | p=0,595        |
| 5054+3           | 0,0131         | p=0,992        | -0,0853        | p=0,946        | -0,0347        | p=0,978        | -0,0009        | p=0,999        | -0,1430        | p=0,909        |
| 5156+1           | 0,2171         | p=0,861        | -0,2493        | p=0,840        | -0,2257        | p=0,855        | -0,0251        | p=0,984        | 0,8978         | p=0,290        |
| 5156+3           | -0,7840        | p=0,426        | 0,7754         | p=0,435        | 0,7817         | p=0,429        | 0,8676         | p=0,331        | 0,8146         | p=0,394        |
| 5453+1           | -0,0142        | p=0,991        | 0,0371         | p=0,976        | 0,0218         | p=0,986        | -0,1237        | p=0,921        | 0,3708         | p=0,758        |
| 5453+3           | 0,1899         | p=0,878        | -0,1744        | p=0,888        | -0,1843        | p=0,882        | -0,9658        | p=0,167        | 0,3367         | p=0,781        |
| 5536+1           | -0,9628        | p=0,174        | 0,9659         | p=0,167        | 0,9636         | p=0,172        | 0,9682         | p=0,161        | -0,1646        | p=0,895        |
| 5536+3           | 0,2504         | p=0,839        | -0,2594        | p=0,833        | -0,2528        | p=0,837        | -0,1672        | p=0,893        | 0,8771         | p=0,319        |
| 6928+1           | 0,9446         | p=0,213        | -0,9293        | p=0,241        | -0,9411        | p=0,220        | 0,1321         | p=0,916        | -0,9915        | p=0,083        |
| 6928+3           | 0,9014         | p=0,285        | -0,8855        | p=0,308        | -0,8976        | p=0,291        | -0,9876        | p=0,100        | -0,5376        | p=0,639        |

Valores em negrito são significantes a  $p < 0,05$

RVI (Ratio Vegetation Index), RATIO (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

Por meio da utilização dos índices de vegetação apresentados na Tabela 5, safra 2012/13, muito embora uma relação direta entre produtividade e resposta espectral tenha sido observada em algumas situações, de forma geral, os IVs não foram influenciados pela produtividade (TCH).

Machado (2003) relata que o estudo da análise de correlação e ajuste de modelos matemáticos que representem a relação entre a produtividade e sua resposta espectral, através da utilização de dados espectrais (níveis de cinza ou reflectância), pode contribuir para uma maior precisão na estimativa da produção da cana-de-açúcar. Resultado oposto foi encontrado neste trabalho.

Pode-se comprovar que as variedades de cana-de-açúcar aqui estudadas, mesmo que não significativas, apresentam diferenças na resposta espectral. Tal constatação indica ser necessário conduzir estudos mais detalhados, incluindo na análise do comportamento espectral novas variáveis físicas e químicas, com o uso destes sensores e entender melhor o comportamento espectral da cana-de-açúcar. Além disso, devem ser conduzidos estudos para correlacionar o comportamento dos IVs ao longo do tempo com a produtividade e definir qual o melhor momento para utilizar os IVs estimado pelo sensor como suporte para previsão de produtividade.

Segundo Abdel-Rahman e Ahmed (2008), diversos trabalhos foram realizados com o intuito de estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar com base em modelagem matemática e dados de Sensoriamento Remoto (SR); porém, nenhuma delas resultou em uma metodologia viável para o uso operacional. Os autores ainda relatam que não existem modelos de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar que gerem estimativas confiáveis; pois, de acordo com Batchelor et al. (2002), os modelos têm limitações para estimar perdas provocadas pelos diversos fatores que compõem e influenciam a produtividade agrícola.

#### **6.4. CONCLUSÕES**

Os resultados dos índices de vegetação neste estudo registraram baixo potencial de sua utilização para diferenciação de variedades e folhas de cana-de-açúcar.

Pela análise de correlação dos dados, não foi possível estabelecer uma relação direta entre produtividade e resposta espectral das folhas de cana-de-açúcar.

## 6.5. REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrid) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.13, p. 3753-3767, 2008.
- Ayala-Silva, T.; BEYL, C.A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advantages in Space Research**, Elmsford, v. 35, p. 305-317, 2005
- BATCHELOR, W. D.; BASSO, B.; PAZ, J. O. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 141-158, Dec. 2002.
- BENVENUTI, F.A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. Campinas, SP: [s.n.], 2005. Dissertação (Mestrado). 120p.
- CASAGRANDE, A. A. 1991. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 157p.
- CEZAR, E. **Avaliação das características químicas e do comportamento espectral da Torta de Filtro/Matéria Orgânica / Vinhaça por meio da espectrorradiometria difusa**. Maringá, 2012. 178p. Tese (Doutorado)
- EPIPHANIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B. F.T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, jun., 1996.
- FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R.; FORMAGGIO, A.R. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital. **Bragantia**, v. 69, n. 02, p.453-466, 2010.
- FIRMINO, J.L.N.; LIMA, E.A.; GOMES Filho, M.F.; ARAÚJO, P.C. Identificação de impactos ambientais através da análise comparativa do índice de vegetação derivado do satélite Landsat - 5 para a cidade de São João do Rio do Peixe na Paraíba com a precipitação. **Revista Verde** (Mossoró – RN – Brasil) v.4, n.2, p. 17 - 22 abril/junho de 2009.
- Food and Agricultural Organizations of the United Nations – FAO. **Food and Agricultural commodities production**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: dez/2012.
- 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, 58: 289-298, dec., 1996.
- GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. Piracicaba, ESALQ, 1997. 118p. Tese (Doutorado).
- HEEGE, H.J.; REUSCH, S.; THIESSEN, E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 9, n. 3, p. 115-131. 2008.
- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images. **Remote Sensing of Environment**, v.59, n.3, p.440-451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 01, p. 195–213, 2002.

Huete, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, v.34, n.2, p.101-114, 1996.

JENSEN, J. R. Remote Sensing of Water. In: Remote Sensing of the Environment an earth resource perspective. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. cap.11, p. 379-406.

JENSEN, J. R; **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coord. et al); São José dos Campos, Sp: Parêntese, 2009. 598p.

JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A. The Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global research. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.

LAURENTINO, M. L.S; SILVA, H.A; SILVA, J.C.B; SANTANA.S.H.C.; MORAIS.Y.C.B.; GALVÍNCIO, J. D. Aplicação dos índices de NDVI e EVI como análise da variação fisionômica da vegetação no Brejo de Altitude de Serra Negra-Bezerros/PE-Brasil. In **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.3182.

LIRA, V.M.; SILVA, B.B.; NETO, J.D.; FARIAS, M.S.S.; BEZERRA, M.V.C.; FRANCO, E.S.; CENTENO, C.R.M. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 1, p. 113-120, jan/abr, 2009.

LIU, W.T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. UNIDERP, Brochura, 1ª Ed., 2006.

MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 ETM+**. Campinas, SP: [s.n.], 2003. Dissertação (Mestrado).

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992.124p.

MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Amsterdam, v. 4, p. 18, Nov. 2010.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320p.

MOREIRA, M. A.; SHIMABUKURO, Y. E. **Cálculo do índice de vegetação a partir do sensor AVHRR**. Capítulo 4, p. 80-101. In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N / Coordenador Nelson Jesus Ferreira. São Paulo, Oficina de Textos, 2004.

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

NANNI, M. R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Piracicaba, 2000.

NANNI, M. R.; OLIVEIRA, R. **Levantamento pedológico detalhado das áreas de produção de cana industrial da cooperativa Cooperval**. Relatório Técnico. 85 p. 2009.

- NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 02, p. 393-407, 2006.
- NOH, H.; ZHANG, Q.; HAN, S.; SHIN, B.; REUM, D. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. **Transactions of the ASAE**, v.48, p.393-401, 2005.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363p.
- PAPA, R. A. **Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectroradiometria, câmera digital e imagem ASTER**. Brasília, 2009. 132 p. Dissertação de Mestrado.
- PELLEGRINO, G. Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. Campinas, SP: [s.n.], 2001. Tese (Doutorado).
- PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, p.21-22, 2002.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007. 127 p.
- Ponzoni, F.J.; Shumabukuro, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**, São José dos Campos: Ed. A Silva Vieira, 2010, 127p.
- PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônômico para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado).
- Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar - PMGCA. **Variedades RB de Cana-de-Açúcar**. CCA/UFSCar. 2008. 31p.
- RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H.; et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2: ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p. 233-239. (**Boletim técnico, 100**)
- RAMOS, R. R. D.; LOPES, H. L. ; JUNIOR, J.C.F.M.; CANDEIAS, A.L.B. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DA VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) NA AVALIAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS E POTENCIAIS PARA UNIDADES DE CONSERVAÇÃO. In **Anais... III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010** p. 001 – 006.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(12): 1541-1552, 1977.
- ROSENDO, J. DOS SANTOS. J. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do Rio Araguari – MG utilizando dados do sensor MODIS**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.2005.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. Proceedings**. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309- 317.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. **Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura**. INPE – São Jose dos Campos. 2002.

SHAPIRO, S. S; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v.52, n.2, 1965.

SILVA, C. A. V.; DA SILVA, H. A.; OLIVEIRA, T.H.; GALVINCIO, J.D. Uso do Sensoriamento Remoto através de Índices de Vegetação NDVI, SAVI e IAF na microrregião de Itamaracá – PE. In **Anais...** XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 3079-3085.

SILVA, E.M.; MARANGON, G.P.; Dessbesell, L.; Moraes, W.W.; Lippert, D.B.; Pereira, R.S. Caracterização espectral na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 285 - 292, abr./jun. 2012.

STRENNER, M. Comparison of different vegetation indices and their suitability to describe N-uptake in winter wheat for precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 10, 2010, Denver. Denver: Colorado State University, 2010.

XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; BERKA, L.M.S.; MOREIRA, M.A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p.755-768, 2006.

ZANZARINI, F.V.; PISSARRA, T.C.T.; BRANDÃO, F.J.C.; TEIXEIRA, D.D.B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n.6, p.608–614, 2013.

## 7. CAPÍTULO 4

### **Índices de vegetação originados dos sensores orbital e terrestre aplicados na discriminação de variedades e correlação com a produtividade na cultura da cana-de-açúcar**

## RESUMO

O planejamento e o gerenciamento agrícola necessitam de informações cada vez mais precisas e em tempo hábil. Com isso, o sensoriamento remoto tornou-se uma importante ferramenta na extração de diversas informações necessárias à agricultura. Assim, este trabalho objetivou avaliar o desempenho do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e do índice de vegetação realçado (EVI), obtidos por dois sensores: um orbital, o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e outro terrestre, o ASD FieldSpec 3, em áreas com a cultura da cana-de-açúcar. No levantamento de campo foram obtidos os dados de produtividade, solo, variedades e localização de cada pixel para cada talhão. Foram ainda coletadas 100 folhas (+1 e +3) por talhão para leitura da curva espectral em laboratório. O acompanhamento desta cultura aconteceu por duas safras, 2011/12 e 2012/13. As imagens utilizadas foram os produtos de reflectância de superfície composição de dezesseis dias (MOD13Q1), contendo quatro bandas e dois índices de vegetação o NDVI e o EVI. O teste de *Tukey* para comparação de médias foi aplicado aos índices com a intenção de verificar, dentro de cada sensor, a existência ou não de diferença significativa entre esse e as variedades/folhas amostradas, a um nível de significância de 5 %. Também foi aplicado o teste de correlação de *Pearson* entre os índices e a produção dos talhões. Os resultados demonstraram que tal comparação possibilitou verificar a baixa sensibilidade dos diferentes índices frente à influência do comportamento espectral na discriminação das variedades/folhas e do dossel da cultura. Da mesma forma, as correlações dos índices entre os sensores e destes com a produtividade pouco foram significativas, permitindo concluir, neste trabalho, que não houve correlação entre os sensores MODIS e FieldSpec 3.

Palavras chave: Espectrorradiometria de campo. Produto MOD13Q1. Variáveis Espectrais.

## ABSTRACT

Modern agriculture planning and management demand a great deal of accurate information. Remote sensing has become an important tool in gathering agriculture information. For this reason, this work aimed at evaluating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Enhanced Vegetation Index (EVI) performance, which were obtained from sugarcane crops by two types of sensors: an orbital sensor (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - MODIS), and a field sensor (ASD FieldSpec 3). Field data included productivity, soil, varieties and pixel location of each sugarcane zones. As many as 100 leaf samples (+1 e +3) by zone were collected for analysis of the spectrum curves in laboratory. Crops from two seasons (2011/12 and 2012/13) were monitored. Analysis of the resulting images involved observation of parameters such as surface reflectance composed of sixteen days (MOD13Q1) with four bands and two index vegetation; NDVI and EVI. The *Tukey* test was used for comparing mean index values as to verify, for the data collected from each sensor, the existence of 5% significant difference among varieties/ sampled leaves. The *Pearson* test was also employed for correlating indexes and production for each zone. Results indicate low sensitivity of the different indexes as a function of the spectrum behavior for varieties/leaf discrimination. Similarly, no important significance was identified for the correlation between the indexes obtained from the two sensors (MODIS and FieldSpec 3) or between the indexes and productivity.

Keywords: Spectroradiometry field. Product MOD13Q1. Spectral variables.

## 7.1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar destaca-se como um dos principais produtos agrícolas do Estado do Paraná, que é o segundo maior produtor brasileiro. É a mais recente cultura desenvolvida no Estado, sendo exportada para outros países na forma de açúcar e etanol.

O desenvolvimento tecnológico na área agrícola tem se tornado uma peça fundamental no incremento produtivo e econômico. O planejamento e o gerenciamento agrícola necessitam de informações cada vez mais precisas e em tempo hábil. Com isso, o sensoriamento remoto tornou-se uma importante ferramenta na extração de diversas informações necessárias à agricultura (Goltz et al., 2007).

No âmbito do sensoriamento remoto, o monitoramento do ciclo vegetativo das culturas agrícolas é realizado através de observações das curvas espectrais da vegetação e, principalmente, através da geração e análise dos índices de vegetação (IV).

Os índices de vegetação podem ser definidos como a combinação de dados de bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de realçar a relação desses dados com os parâmetros da vegetação. Para minimizar a variabilidade causada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido combinada em vários índices de vegetação (Ponzoni, 2001). Estudos já foram realizados utilizando estes índices como indicadores qualitativos e quantitativos da vegetação, dentre os quais podemos citar os trabalhos realizados por Rosendo (2005); Silva et al. (2009); Ramos et al. 2010; Laurentino et al. (2011), dentre outros.

Segundo Moreira e Shimabukuro (2004) existem mais de 50 IVs e dentre os quais o NDVI é mais comumente utilizado. Índices espectrais de vegetação como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o EVI (Enhanced Vegetation Index) têm demonstrado grande potencial no monitoramento agrícola e em várias outras aplicações feitas por cientistas, agências governamentais e instituições educacionais na detecção de mudanças ou na estimativa das propriedades biofísicas da vegetação (Leeuwen et al., 1999). Para Huete et al. (2002), o NDVI vem sendo utilizado em muitos estudos e em aplicações de várias áreas, tais como: agricultura, floresta, saúde, epidemiologia, monitoramento das condições ambientais e desmatamento.

Embora numericamente os valores do NDVI possam variar no intervalo de -1 a +1, a vegetação está associada aos valores positivos (Backes, 2010). Conforme Ponzoni e Shimabukuro (2007) o limite superior aproxima-se de 0,80, que, de acordo com Silva et al. (2007), está associado a vegetação vigorosa. Materiais que refletem mais intensamente na banda do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água, neve)

apresentam índice negativo. Solos descobertos e rochas refletem os dois comprimentos de onda em intensidade semelhante, logo, o NDVI aproxima-se de zero (Rizzi, 2004). O EVI (Enhanced Vegetation Index) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de regiões com maiores biomassas e melhorando o monitoramento da vegetação ao passo que reduz influências atmosféricas e reduz influências do fundo do dossel e do solo (Lopes et al., 2010) e também responde melhor às variações fisionômicas e estruturais no dossel (Gao et al., 2000). Estes índices podem ser analisados por meio da interpretação de imagens de sensores remotos e, em particular, por valores obtidos em diferentes datas, que permitem avaliar a variação da área verde em certo período de tempo (Zanzarini et al., 2013).

Além dos avanços tecnológicos que podem auxiliar as pesquisas da comunidade científica, a área do Sensoriamento Remoto, relacionada aos recursos naturais, tem propiciado grandes avanços no que diz respeito a projetos integrados que otimizam as oportunidades de recursos (Lohmann et al., 2007). Uma dessas iniciativas é promovida pelo programa EOS (Earth Observation System) da NASA (National Agency of Space and Aeronautics), no qual grande quantidade de dados é disponibilizada para a pesquisa.

Entre os sensores orbitais do programa EOS, destaca-se o sensor MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), lançado à bordo da plataforma TERRA, em dezembro de 1999, e da plataforma AQUA, em maio de 2002 (Townshend e Justice, 2002). O MODIS combina algumas características do sensor “advanced very high resolution radiometer” (AVHRR) e dos sensores da série LANDSAT, com melhoria nas correções atmosféricas (Vermote et al., 2002) e geométricas dos dados (Wolfe et al., 2002), que são coletados em resolução temporal quase diária e resolução espacial de 250 m nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (Justice et al., 2002).

Segundo Rudorff et al. (2007) e Aguiar (2008), o significativo avanço na área de sensoriamento remoto proporcionado pelo MODIS se deve não apenas à forma inovadora na qual foi concebido o sensor, mas também ao conceito da política de distribuição gratuita das imagens bem como de produtos de alta qualidade.

Dentre os produtos disponibilizados pela EOS, estão os índices de vegetação MOD13. Anderson et al. (2003), relatam que as imagens índices de vegetação, obtidas dos dados MODIS (MOD13) têm como objetivo fornecer dados consistentes para comparações temporais e espaciais das condições da vegetação, em nível global, ou seja, monitorar a atividade fotossintética da vegetação para detectar mudanças no vigor vegetativo e associar as condições biofísicas e fenológicas das mesmas.

Nesse contexto, o presente trabalho consistiu na estimativa e na análise da reflectância de superfície a partir das imagens adquiridas pelo sensor MODIS/TERRA e sua confrontação com os dados reais de campo medidos com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 no momento da passagem do satélite pela região de estudo, visando, por meio dos índices de vegetação NDVI e EVI, discriminar variedades de cana-de-açúcar e correlacionando-as com sua produtividade.

## 7.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 7.2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado na área de abrangência da Cooperativa Agroindustrial Vale do Ivaí LTDA - COOPerval, sediada no município de Jandaia do Sul - PR, cuja área plantada com cana é de 16.000 ha, num raio em torno de 60 km em relação ao complexo industrial.

A área do estudo localiza-se no município de Bom Sucesso, Mesorregião do Norte Central Paranaense (Figura 1a), cujas coordenadas centrais são latitude 23°42'36"S e a longitude 51°45'50". A altitude varia de 520 a 580 m. O clima da região é o tropical de altitude, tipo Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, clima subtropical ou temperado úmido, sem estação seca e de verão longo e quente. Ocorrem de zero a três geadas noturnas por ano. A precipitação é superior a 1.400 mm ano<sup>-1</sup>.

De acordo com Nanni e Oliveira (2009), o solo predominante na área foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico.

A área é de aproximadamente 623,43 hectares cultivados com cana-de-açúcar (Figura 1a), sendo distribuídos em sessenta subáreas (talhões) de tamanhos e formas distintas situados em seis fazendas (microrregiões) (Figura 1b). Seis diferentes variedades de cana-de-açúcar (grupo de maturação precoce: RB 845156 e RB 966928; grupo de maturação médio: RB 835054 e RB 855453; grupo de maturação tardio: RB 72454 e RB 855536) e duas posições de folhas (+1 e +3) foram repetidas e coletadas aleatoriamente dentro dos respectivos talhões. As variedades referidas foram escolhidas em função de sua representatividade quanto ao volume de produção na região do estudo.

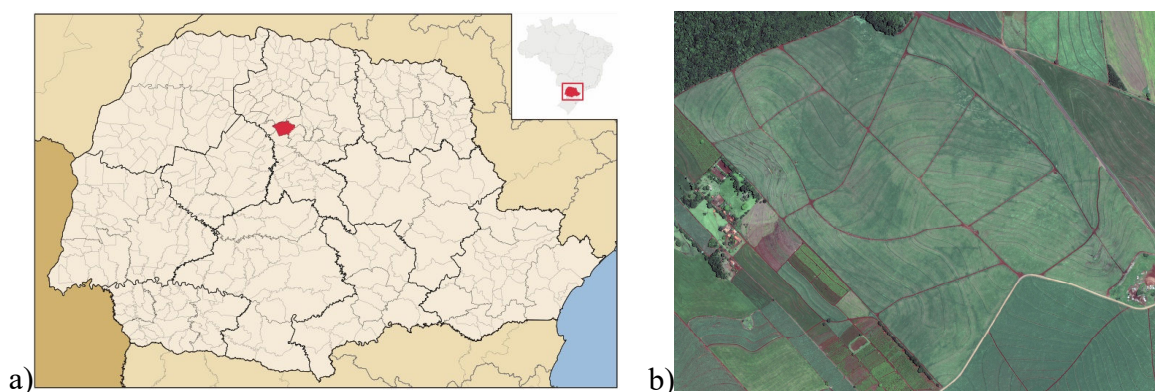


Figura 1. Mapa de localização da área do estudo (a) e o detalhamento da divisão interna em talhões (b).

Sistema de Projeção em Latitude-Longitude, Datum WGS-84.

### 7.2.2. Amostragem

O início das campanhas de campo para aquisição das informações relativas as variáveis biofísicas da cana-de-açúcar e coleta das folhas, ocorreu a partir de abril de 2011.

Visando uma aplicação mais ampla do método desenvolvido no trabalho, optou-se por realizá-lo em cana-soca, já que no ciclo de vida total de um canavial a cana-soca é predominante. Nessa condição, o ciclo anual da cultura se completa em 12 meses, em média, o que facilita as análises comparativas da resposta espectral entre os diversos cortes da cana-soca. O trabalho foi realizado em duas safras agrícolas (2011/2012 e 2012/2013), onde o método aplicado à coleta de dados foi sendo aperfeiçoado e adaptado às condições do estudo de acordo com as análises preliminares bem como com a disponibilidade de recursos.

Como citado por Casagrande (1991), as folhas foram numeradas pelo sistema de Kuijper (Figura 2). As coletas das folhas ocorreram uma semana anterior a colheita. Como existem divergências na literatura de qual folha usar (folha diagnóstico), a avaliação foi definida pela amostragem de cem plantas por talhão, coletando 100 folhas +1 (Raij e Cantarella, 1997), como também, 100 folhas +3 (Malavolta, 1992).

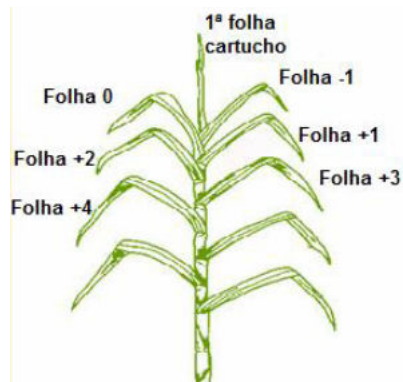


Figura 2. Sistema de numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper (Casagrande, 1991).

No procedimento de coleta, dividiu-se a folha em três partes, cortando a parte central com aproximadamente 0,30 m. As folhas foram identificadas, separadas em sacos plásticos e acondicionadas em câmaras úmidas com temperaturas reduzidas para evitar-se a degradação das mesmas antes de serem encaminhadas ao laboratório e armazenadas no refrigerador até o momento das leituras (Tisot, 2009; Brandelero et al., 2012; Silva et al., 2012).

### 7.2.3. Obtenção dos dados radiométricos em laboratório (Espectrorradiometria)

A leitura espectral foi realizada num total de 360 folhas (180 folhas +1 e 180 folhas +3). Estas foram, uma a uma, dispostas sobre um cubo de madeira (0,15 m de altura x 0,20 m

de lado) utilizado como base, revestido em preto fosco. Uma manta de borracha, também preta e fosca, foi usada sobre as folhas, com abertura de 0,10 m de lado, para deixá-las totalmente abertas. Em cada folha foram coletados quatro espectros, e para a análise estatística, estabeleceu-se a leitura média das quatro medidas espectrais.

Para aquisição dos dados espectrais das folhas em laboratório, foi utilizada a metodologia estabelecida por Abdel-Rahman et al. (2008).

Em ambiente devidamente preparado (Figura 3), foram realizadas as leituras a partir do espectrorradiômetro FieldSpec 3 JR, marca ASD, o qual realiza medidas espectrais na faixa de 350 nm a 2500 nm. O intervalo de amostragem é de 1,4 nm na faixa de 350 nm a 1050 nm e de 2 nm na faixa de 1000 nm a 2500 nm. Sua resolução espectral é de 3 nm na faixa espectral de 350 nm a 700 nm e de 30 nm na faixa de 1400 nm a 2100 nm. O equipamento foi programado para realizar 50 leituras por amostra, gerando a curva espectral média de cada amostra de folha analisada.



Figura 3. FieldSpec 3 JR em ambiente de trabalho.

A geometria de aquisição dos dados, conforme definido por Nanni e Demattê (2006), utilizou-se de placa padrão branca com 100% de reflectância. O leitor de fibra óptica foi colocado em posição vertical de 0,08 m de distância da plataforma de apoio para amostras. A área de leitura foi de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>. A fonte de iluminação utilizada foi composta por um spot marca Mako, contendo *cooler* para resfriamento do sistema e fixado em tripé apropriado, e lâmpada halógena de 650 W para iluminação das amostras, com feixe não colimado para o plano visado, posicionada a 0,35 m da plataforma e com um ângulo de 30° em relação ao plano horizontal. (Figura 4).

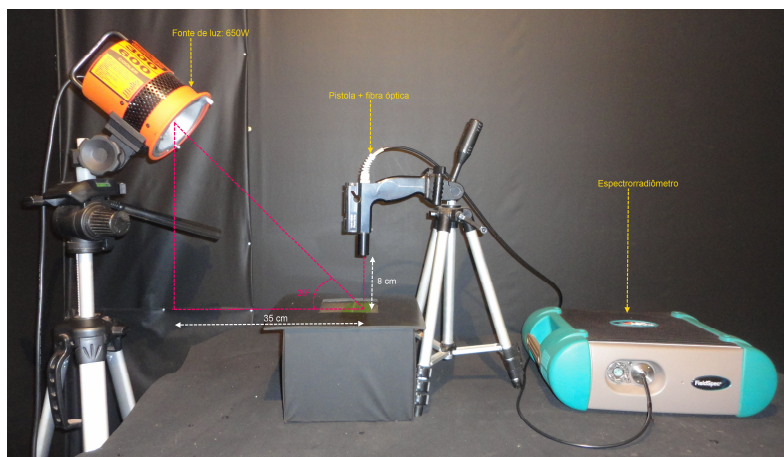


Figura 4. Geometria utilizada na aquisição dos dados de laboratório.

Assim, foi obtido o fator de reflectância bidirecional espectral, que expressa a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de um corpo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, sob as mesmas condições de iluminação e geometria de leitura (Nicodemus et al., 1977).

Para cada folha amostrada, foram realizadas quatro leituras ao longo da mesma. A resposta espectral de cada amostra, utilizada para a análise estatística e discussão deste trabalho, refere-se à média das quatro leituras, assim como realizado por Nanni (2000), Fiorio et al. (2010) e Cezar (2012).

#### 7.2.4. Índices de Vegetação

Para representar a resposta espectral da biomassa da cultura da cana-de-açúcar e avaliar a sua correlação com a produtividade, foram utilizadas bandas referentes a faixa do visível ao infravermelho próximo (IVP), e os seguintes índices de vegetação: RATIO, RVI, NDVI, GNDVI e EVI. Todos os índices calculados neste item baseiam-se em valores de refletância.

Moreira (2000) cita que os primeiros trabalhos (Jordan, 1969; Pearson e Miller, 1972) iniciaram com a utilização da razão simples entre bandas, no caso do infravermelho próximo (IVP) e vermelho (V) originando os índices de vegetação RATIO e RVI, atribuído por Eastman (1999) a Richardson e Wiegand (1977), e dados pelas equações (1) e (2) respectivamente, onde se observava melhor correlação com a biomassa, realçando a resposta da vegetação.

$$RATIO = \frac{IVP}{V} \quad (\text{eq. 1})$$

$$RVI = \frac{V}{IVP} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde IVP: infravermelho próximo e V: vermelho.

Como esses índices são dispostos em forma de razão, não aceitam a divisão por zero. Assim, Rouse et al. (1973 e 1974) propuseram o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que apresenta a vantagem de minimizar efeitos topográficos ao produzir uma escala linear de medida, que é dado pela diferença entre as bandas IVP e V normalizada, ou dividida, pela soma dessas duas bandas e ainda possui a propriedade de variar entre -1 a +1 (quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal), o 0 representa valor aproximado para ausência de vegetação, ou seja, representa superfícies não vegetadas (Epiphanyo et al., 1996; Rosa, 2007; Eastman, 1998), conforme equação 3:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (\text{eq. 3})$$

Entre os índices utilizados por Gitelson et al. (1996), é importante citar o índice de vegetação diferença normalizada verde (“Green”NDVI) dado pela equação 4. Neste estudo este índice será representado pela sigla GNDVI.

$$GNDVI = \frac{IVP - VD}{IVP + VD} \quad (\text{eq. 4})$$

Em que VD: verde.

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação verde, melhorando a sensibilidade para as variações estruturais e arquitetônicas do dossel de fitofisionomias, com maior densidade de biomassa em relação ao NDVI e reduzindo as influências atmosféricas bem como a influência do solo (Huete et al., 2002). O EVI pode ser obtido a partir da equação 5:

$$EVI = G \frac{IVP - V}{IVP + C_1 \times V - C_2 \times A + L} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde: L é o fator de ajuste para o solo; G é o fator de ganho e  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera nas faixas do azul e vermelho do espectro eletromagnético. Os valores dos coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são:  $L=1$ ,  $C_1=6$ ,  $C_2=7,5$  e  $G=2,5$  (Huete et al., 1997; Justice et al., 1998; Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

### 7.2.5. Séries temporais de índices de vegetação (Composições) MODIS

Foram utilizadas imagens do sensor MODIS/TERRA, produto MOD13Q1 da série 5.0, com resolução espacial de 250 m. Este produto inclui as imagens de índice de vegetação

(NDVI e EVI) e as imagens de reflectância de superfície das bandas do azul (B), vermelho (R), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR). As imagens MODIS, produto MOD13, não apresentam a necessidade de correções atmosféricas ou normalizações, tendo em vista os processamentos anteriores aplicados para a geração do produto.

As séries temporais de NDVI e EVI, composição de 16 dias, foram obtidas, gratuitamente, do Land Processes Distributed Active Archive Center da Agência Espacial Norte-Americana (NASA) através do Warehouse Inventory Search Tool (WIST), no endereço eletrônico <http://glovis.usgs.gov/>

Foram tomadas imagens do *tile* (quadrantes com aproximadamente 1200 km por 1200 km na linha do Equador) H13V11 (Figura 5), que abrange a área de estudo, para o período 2011 a 2013. As imagens disponibilizadas são em formato HDF-EOS (*Hierarchical Data Format – Earth Observing System*) e projeção Sinusoidal, de difícil manipulação na maioria dos softwares de geoprocessamento. Através do software MRT (Modis Reprojection Tool) desenvolvido pela EOS, as imagens foram recortadas e convertidas para o formato GeoTIFF (*Georeferenced Tag Image File Format*) e projeção geográfica latitude-longitude com sistema de referência WGS84.

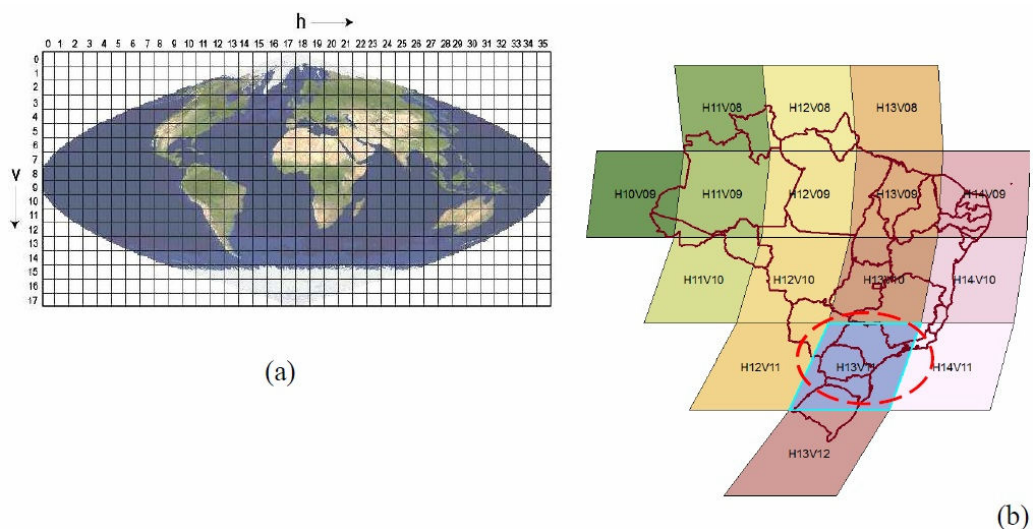


Figura 5. *Tiles* que recobrem o Brasil.

Pelo site <https://www.dsr.inpe.br/laf/series/en/index.html>, foi localizada as microrregiões (Fazendas) e realizado a seleção dos *pixels* nos talhões correspondentes a cada variedade (Figura 6).

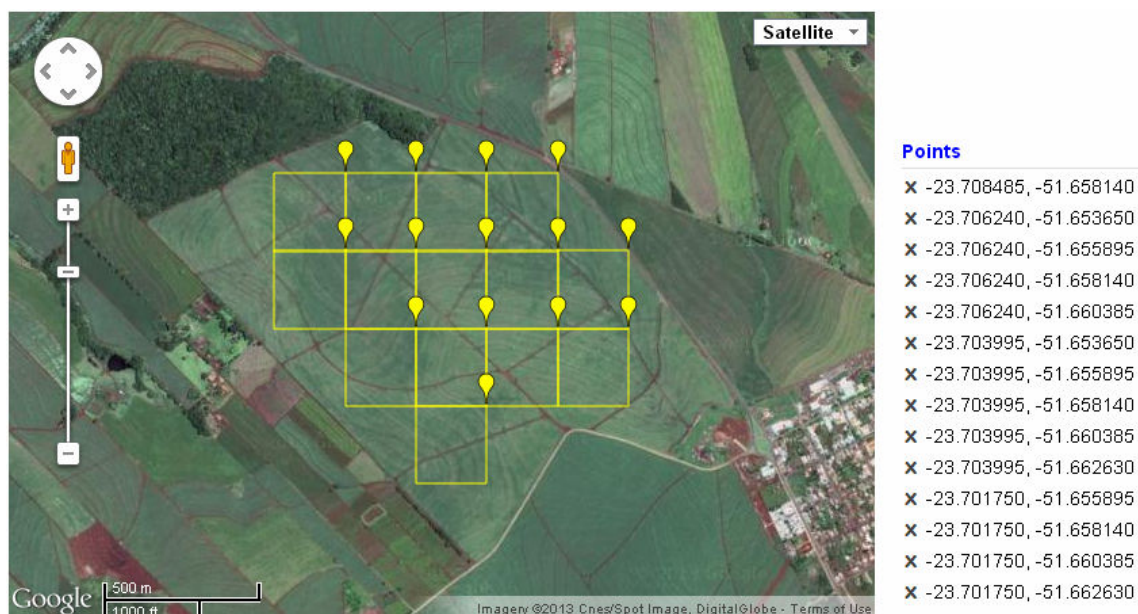


Figura 6. Seleção dos *pixels* em uma microrregião, Fazenda Marumbi, e suas coordenadas.

O programa ENVI (*Exelis Visual Information Solutions*, 2012) foi utilizado para extrair os valores espectrais médios dos *pixels* dos talhões nas imagens dos IVs.

As datas correspondentes ao período de colheita nas safras 2011/12 e 2012/13 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Datas de amostragem em campo nas microrregiões e datas das imagens MODIS.

| Variedade | 2011          |            | 2012          |            |
|-----------|---------------|------------|---------------|------------|
|           | Data de Campo | Data MODIS | Data de Campo | Data MODIS |
| 72454     | 05/10         | 30/09      | 18/09         | 13/09      |
| 835054    | 25/05         | 09/05      | 23/07         | 11/07      |
| 855156    | 09/04         | 22/03      | 02/05         | 22/04      |
| 855453    | 27/05         | 25/05      | 30/06         | 25/06      |
| 855536    | 02/09         | 29/08      | 17/08         | 12/08      |
| 966928    | 16/05         | 23/04      | 24/06         | 09/06      |

#### 7.2.6. Produtividade da cana-de-açúcar

Cabe mencionar que a área do estudo é de lavoura comercial, sendo que as produtividades individuais (por talhão) foram obtidas de acordo com os procedimentos normais de colheita da unidade produtora (Cooperval). A produtividade de cana (tonelada de cana por hectare - TCH) foi obtida em  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

### 7.2.7. Análises estatísticas

Antes da aplicação dos testes estatísticos, verificou-se a normalidade dos conjuntos de dados (premissa para escolha do teste a ser aplicado) por meio do teste W, apresentado em Shapiro e Wilk (1965).

Os índices de vegetação (IVs), foram analisados por procedimentos de análise estatística descritiva (média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão da média, valor máximo e valor mínimo), utilizando-se o pacote estatístico STATISTICA versão 10 (Statsoft, 2010). Também foram determinados os quartis superiores (QS), quartis inferiores (QI) e a amplitude interquartis (AI), necessários para avaliar se dados periféricos podem ser considerados candidatos a “outliers” (Libardi et al., 1996; Gonçalves, 1997).

$$AI = QS - QI \quad (\text{eq. 1})$$

Os limites, inferior (LI) e superior (LS), para a caracterização de dados de comportamento possivelmente atípico, foram definidos pelas equações:

$$LI = QI - 1,5 * AI \quad (\text{eq. 2})$$

$$LS = QS + 1,5 * AI \quad (\text{eq. 2})$$

Nos casos em que os parâmetros estudados apresentaram valores discrepantes (“outliers”), esses foram descartados e, nessas situações, foram aplicados novamente os procedimentos da análise descritiva sem os valores discrepantes.

Em seguida foi realizada análise exploratória dos dados, premissa inicial para verificar e descrever as medidas estatísticas e matemáticas dos dados, o que melhora a eficiência da análise estatística (Farias, 1999). Após isto, os dados para cada variedade nas quatro épocas de colheita, foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas por meio do teste estatístico de *Tukey*, considerando 95% de confiança, no pacote estatístico ASSISTAT Versão 7.6 beta (2012).

Posteriormente foi montada a matriz de correlação de *Pearson*, identificando as correlações significativas entre os parâmetros colorimétricos e a produção, no programa STATISTICA 10.

### 7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores médios de NDVI e EVI, de cada variedade, obtidos com os sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA para as safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente.

Tabela 2. Valores de NDVI e EVI, obtidos com os sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA, para a safra 2011/12.

|        | FieldSpec 3 |           | MODIS     |           |
|--------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|        | NDVI        | EVI       | NDVI      | EVI       |
| 454+1  | 0,4017 def  | 0,4483 de | 0,5705 d  | 0,3011 c  |
| 454+3  | 0,3895 efg  | 0,4091 f  | 0,5705 d  | 0,3011 c  |
| 5054+1 | 0,4230 cd   | 0,4872 c  | 0,7598 ab | 0,5036 ab |
| 5054+3 | 0,4144 cde  | 0,4756 cd | 0,7598 ab | 0,5036 ab |
| 5156+1 | 0,4986 a    | 0,5426 ab | 0,8319 a  | 0,6036 a  |
| 5156+3 | 0,4407 bc   | 0,5080 bc | 0,8319 a  | 0,6036 a  |
| 5453+1 | 0,4244 cd   | 0,4837 cd | 0,6551 cd | 0,4125 bc |
| 5453+3 | 0,3699 g    | 0,4343 ef | 0,6551 cd | 0,4125 bc |
| 5536+1 | 0,3684 g    | 0,4177 ef | 0,6988 bc | 0,4721 b  |
| 5536+3 | 0,3831 fg   | 0,4321 ef | 0,6988 bc | 0,4721 b  |
| 6928+1 | 0,4874 a    | 0,5625 a  | 0,7934 a  | 0,5373 ab |
| 6928+3 | 0,4686 ab   | 0,5447 a  | 0,7934 a  | 0,5373 ab |
| CV %   | 3,31        | 3,37      | 5,87      | 12,21     |

As médias seguidas pela mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

A influência das variedades nas leituras dos IVs podem ser observadas, na Tabela 2, quando se analisa o comportamento das médias dos NDVIs e EVIs obtidos pelos sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA, bem como pelas diferenças do coeficiente de variação (CV) para uma mesma safra. Percebe-se que os valores do NDVI obtidos pelo espectrorradiômetro FieldSpec 3 apresentam-se inferiores aos obtidos pelo MODIS. Estes resultados estão em desacordo com os obtidos por Goltz et al. (2007), que trabalhando com variedades de soja, encontraram valores maiores para a espectrorradiometria de campo e menores para orbital. Já o EVI apresentou comportamento inverso ao NDVI, concordando com Goltz et al. (2007). Ainda de acordo com a Tabela 2, nota-se que houve discriminação de variedades pelos dois

sensores, sendo que o NDVI obtido pelo espectrorradiômetro FieldSpec 3 discriminou apenas a variedade 454 das demais e com o EVI isto aconteceu com três variedades, 5054, 5536 e 6929. Pelo sensor MODIS, a separação de variedades ocorreu em três para o NDVI, 5054, 5536 e 6928, e uma para o EVI, 454.

Observa-se na Tabela 3, assim como na Tabela 2, que os CVs, segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2002), são considerados baixos (NDVI e EVI pelo FieldSpec e NDVI pelo MODIS) se inferiores a 10% e médio (EVI pelo MODIS), quando estão no intervalo de 10 a 20%, verificando que as condições do experimento foram bem controladas, uma vez que se trata de experimento em campo aberto onde as variáveis são de difícil controle.

Tabela 3. Valores de NDVI e EVI, obtidos com os sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA, para a safra 2012/13.

|        | FieldSpec 3 |           | MODIS/TERRA |          |
|--------|-------------|-----------|-------------|----------|
|        | NDVI        | EVI       | NDVI        | EVI      |
| 454+1  | 0,5044 ab   | 0,5209 b  | 0,5383 c    | 0,3549 b |
| 454+3  | 0,4548 cde  | 0,4615 d  | 0,5383 c    | 0,3549 b |
| 5054+1 | 0,4110 f    | 0,4686 cd | 0,7596 ab   | 0,5181 a |
| 5054+3 | 0,4369 ef   | 0,4688 cd | 0,7596 ab   | 0,5181 a |
| 5156+1 | 0,5285 a    | 0,6000 a  | 0,7318 ab   | 0,4806 a |
| 5156+3 | 0,5117 ab   | 0,5766 a  | 0,7318 ab   | 0,4806 a |
| 5453+1 | 0,4465 def  | 0,5057 bc | 0,7404 ab   | 0,4793 a |
| 5453+3 | 0,4510 def  | 0,5176 b  | 0,7404 ab   | 0,4793 a |
| 5536+1 | 0,5169 ab   | 0,5865 a  | 0,6881 b    | 0,5071 a |
| 5536+3 | 0,4950 abc  | 0,5786 a  | 0,6881 b    | 0,5071 a |
| 6928+1 | 0,5065 ab   | 0,5359 b  | 0,8065 a    | 0,5000 a |
| 6928+3 | 0,4859 bcd  | 0,5214 b  | 0,8065 a    | 0,5000 a |
| CV %   | 3,96        | 3,39      | 5,00        | 10,63    |

As médias seguidas pela mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

Pode-se comprovar, na Tabela 3, que as variedades de cana-de-açúcar estudadas, apresentaram uma tendência de queda nos valores do NDVI e EVI, o que era esperado. A menor precipitação verificada em 2012 até o período de estiagem (julho a setembro) na área, condicionaram a planta a um estresse e em plantas estressadas há um decréscimo na absorção

pela clorofila, diminuindo também a reflectância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células da planta. Esse decréscimo leva a um aumento na reflectância no vermelho (Ayala-Sila et al., 2005; Noh et al., 2005), causando alterações nos valores dos IVs.

Constatou-se ainda que o comportamento do EVI, na safra 2012/13, inverteu comparativamente a safra 2011/12, sendo o que, assim como o NDVI, também apresentou valores inferiores ao EVI obtido pelo sensor MODIS. Esta diferença entre os dois sensores pode ser devida a diferença nas datas de coletas das informações de leitura espectral no campo e orbital (Tabela 1) e que somado a estiagem talvez explique tal comportamento na resposta espectral.

De acordo com Teillet et al. (1997) apud Quarto Junior (2008), valores para o NDVI, calculados a partir de dados de diferentes sensores, para os mesmos alvos e sob condições idênticas de imageamento, não são diretamente comparáveis, pois, dentre outros fatores (p.ex.: resolução espacial), os sensores apresentam bandas com intervalos espectrais distintos, o que resultará em valores diferentes para as bandas V e IVP, logo no NDVI calculado.

Pontes et al. (2005), utilizando sensoriamento remoto orbital em cana-de-açúcar, observaram que no início do ciclo vegetativo a diferença entre os valores de NDVI não foi expressiva. A saturação do NDVI ocorreu imediatamente após o período das chuvas, onde a diferença entre talhões que apresentaram maior e menor biomassa foi mais perceptível. Após esse período de saturação, correspondente à senescência das plantas e concentração de açúcar, não existiu diferença significativa de valores de NDVI. O valor máximo de NDVI corresponde ao pico do ciclo vegetativo da cultura.

A fim de correlacionar a produtividade da cana-de-açúcar com os IVs, utilizou-se dos valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Produtividade (TCH) da cana-de-açúcar nas safras 2011/12 e 2012/13.

| Variedade / folha | TCH       |            |
|-------------------|-----------|------------|
|                   | 2011/12   | 2012/13    |
| 454+1             | 53,172 c  | 51,678 c   |
| 454+3             | 53,172 c  | 51,678 c   |
| 5054+1            | 117,948 a | 91,876 b   |
| 5054+3            | 117,948 a | 91,876 b   |
| 5156+1            | 117,766 a | 63,280 bc  |
| 5156+3            | 117,766 a | 63,280 bc  |
| 5453+1            | 83,844 b  | 78,280 bc  |
| 5453+3            | 83,844 b  | 78,280 bc  |
| 5536+1            | 114,924 a | 102,244 ab |
| 5536+3            | 114,924 a | 102,244 ab |
| 6928+1            | 127,186 a | 139,014 a  |
| 6928+3            | 127,186 a | 139,014 a  |
| dms               | 26,094    | 39,403     |
| CV %              | 11,73     | 20,69      |

As médias seguidas pela mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para variedades/folhas.

O resultado do TCH apresentado na Tabela 4 mostrou que aparentemente o ano mais seco (2012/13) representou queda na produtividade da cana-de-açúcar, uma vez que o manejo da cultura permaneceu o esmo da safra 2011/12.

A seguir é mostrado nas Tabelas 5 e 6, as correlações de Pearson, de cada variedade, entre os valores de NDVI e EVI dos sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA e ainda suas correlações com a produtividade das variedades de cana (TCH).

Tabela 5. Correlação de Pearson entre índices de vegetação NDVI e EVI (obtidos com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 e nas imagens MODIS) e produtividade da cana-de-açúcar (TCH) e p-valor, para a safra 2011/12.

|        | NDVI/NDVI     |               | EVI/EVI |         | TCH/NDVI      |                | TCH/NDVI      |                | TCH/EVI |         | TCH/EVI |         |
|--------|---------------|---------------|---------|---------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| 454+1  | <b>0,9807</b> | <b>p=,003</b> | 0,6693  | p=0,217 | 0,4657        | p=0,429        | 0,7580        | p=0,138        | 0,3419  | p=0,573 | 0,5684  | p=0,317 |
| 454+3  | -0,2325       | p=,707        | 0,0391  | p=0,950 | -0,2967       | p=0,628        | 0,7580        | p=0,138        | -0,4189 | p=0,483 | 0,5684  | p=0,317 |
| 5054+1 | -0,8567       | p=,064        | -0,8318 | p=0,081 | 0,6245        | p=0,260        | 0,1515        | p=0,808        | -0,6210 | p=0,264 | -0,4143 | p=0,488 |
| 5054+3 | -0,1839       | p=,767        | -0,0958 | p=0,878 | 0,1530        | p=0,806        | 0,0106        | p=0,986        | -0,6210 | p=0,264 | -0,4143 | p=0,488 |
| 5156+1 | 0,2138        | p=,730        | 0,3770  | p=0,532 | 0,7517        | p=0,143        | 0,7293        | p=0,162        | 0,3492  | p=0,565 | 0,2989  | p=0,625 |
| 5156+3 | 0,8242        | p=,086        | 0,3864  | p=0,521 | -0,0239       | p=0,970        | 0,4649        | p=0,430        | 0,3492  | p=0,565 | 0,2989  | p=0,625 |
| 5453+1 | -0,6416       | p=,243        | -0,6386 | p=0,246 | -0,5062       | p=0,384        | -0,6541       | p=0,231        | 0,8551  | p=0,065 | 0,6650  | p=0,221 |
| 5453+3 | 0,5678        | p=,318        | 0,3429  | p=0,572 | <b>0,9021</b> | <b>p=0,036</b> | <b>0,8999</b> | <b>p=0,037</b> | 0,8551  | p=0,065 | 0,6650  | p=0,221 |
| 5536+1 | -0,0961       | p=,878        | -0,0952 | p=0,879 | -0,4002       | p=0,504        | -0,4894       | p=0,403        | -0,2996 | p=0,624 | -0,6477 | p=0,237 |
| 5536+3 | -0,0066       | p=,992        | 0,1716  | p=0,783 | -0,6482       | p=0,237        | -0,6800       | p=0,207        | -0,2996 | p=0,624 | -0,6477 | p=0,237 |
| 6928+1 | 0,5778        | p=,308        | 0,8476  | p=0,070 | 0,7962        | p=0,107        | 0,6896        | p=0,198        | 0,2189  | p=0,724 | 0,4977  | p=0,394 |
| 6928+3 | 0,3619        | p=,550        | -0,5294 | p=0,359 | 0,8488        | p=0,069        | 0,3791        | p=0,529        | 0,2189  | p=0,724 | 0,4977  | p=0,394 |

Valores em negrito são significantes a  $p < 0,05$ .

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

Tabela 6. Correlação de Pearson entre índices de vegetação NDVI e EVI (obtidos com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 e nas imagens MODIS) e produtividade da cana-de-açúcar (TCH) e p-valor, para a safra 2011/12.

|        | NDVI/NDVI |         | EVI/EVI       |                | TCH/NDVI |         | TCH/NDVI       |                | TCH/EVI |         | TCH/EVI |         |
|--------|-----------|---------|---------------|----------------|----------|---------|----------------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| 454+1  | -0,0170   | p=0,978 | 0,2472        | p=0,688        | 0,5711   | p=0,315 | 0,6762         | p=0,210        | 0,0591  | p=0,925 | -0,3542 | p=0,559 |
| 454+3  | -0,0636   | p=0,919 | -0,1968       | p=0,751        | -0,0753  | p=0,904 | -0,1750        | p=0,778        | 0,0591  | p=0,925 | -0,3542 | p=0,559 |
| 5054+1 | -0,5916   | p=0,293 | <b>0,8959</b> | <b>p=0,040</b> | -0,5920  | p=0,293 | -0,3147        | p=0,606        | -0,1602 | p=0,797 | -0,6300 | p=0,255 |
| 5054+3 | 0,4382    | p=0,461 | 0,2038        | p=0,742        | 0,3206   | p=0,599 | -0,1269        | p=0,839        | -0,1602 | p=0,797 | -0,6300 | p=0,255 |
| 5156+1 | 0,3677    | p=0,543 | -0,1889       | p=0,761        | 0,1863   | p=0,764 | 0,4351         | p=0,464        | 0,2332  | p=0,706 | -0,2334 | p=0,706 |
| 5156+3 | -0,2678   | p=0,663 | 0,3490        | p=0,565        | -0,2073  | p=0,738 | <b>-0,8821</b> | <b>p=0,048</b> | 0,2332  | p=0,706 | -0,2334 | p=0,706 |
| 5453+1 | -0,2291   | p=0,711 | -0,2241       | p=0,717        | 0,3888   | p=0,518 | 0,6299         | p=0,255        | 0,7040  | p=0,184 | 0,4572  | p=0,439 |
| 5453+3 | 0,4770    | p=0,417 | -0,7184       | p=0,172        | 0,0365   | p=0,954 | <b>-0,9465</b> | <b>p=0,015</b> | 0,7040  | p=0,184 | 0,4572  | p=0,439 |
| 5536+1 | -0,7775   | p=0,122 | -0,4520       | p=0,445        | 0,6651   | p=0,221 | 0,5526         | p=0,334        | -0,6576 | p=0,228 | -0,5414 | p=0,346 |
| 5536+3 | -0,7163   | p=0,173 | -0,2030       | p=0,743        | -0,1470  | p=0,813 | -0,4050        | p=0,499        | -0,6576 | p=0,228 | -0,5414 | p=0,346 |
| 6928+1 | -0,7163   | p=0,173 | -0,2030       | p=0,743        | -0,7085  | p=0,180 | -0,3226        | p=0,597        | 0,1262  | p=0,840 | 0,9300  | p=0,022 |
| 6928+3 | 0,4136    | p=0,489 | 0,5414        | p=0,346        | 0,4308   | p=0,469 | 0,3474         | p=0,567        | 0,1262  | p=0,840 | 0,9300  | p=0,022 |

Valores em negrito são significantes a  $p < 0,05$ .

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index).

Muito embora uma relação direta entre produtividade e resposta espectral das variedades de cana tenha sido observada em algumas situações, pode-se afirmar que os sensores não foram capazes de proporcionar a correlação da resposta espectral do tecido vegetal com a produtividade da cultura. Tal constatação difere do sugerido por Rudorff (1985), onde relata que as imagens adquiridas pouco antes do início da safra (fevereiro/março) fornecem a melhor correlação entre o índice vegetativo e a produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

Produtos gerados pelo sensor MODIS, tem proporcionado a partir do início do milênio um conjunto abrangente de informações ambientais num espaço de tempo entre um a quatro dias. Porém, sua resolução espacial de 250 metros e 500 metros é limitante no monitoramento agrícola em escala local. Ou seja, a menor unidade de informação (o *pixel*) proporcionada abrange uma área pouco maior que 6 hectares ( $62.500 \text{ m}^2$ ), onde a variabilidade em termos agrícolas pode ser alta. Talvez esta variabilidade tenha contribuído para não diferenciação das variedades, o que poderia ser diferente se a área tivesse grandes extensões, ou seja, menor variação.

Galvão et al. (2005) usando dados hiperspectrais adquiridos pelo instrumento Hyperion, a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1), e aplicação de análise discriminante múltipla (MDA) nos valores de reflectância, foi capaz de distinguir entre cinco variedades de canas brasileiras com uma exatidão de classificação de 87,5%.

No entanto, Galvão et al. (2006) não foram capazes de diferenciar entre variedades de cana usando NOAA/AVHRR (National Oceanic e Admissão atmosférica / Avançada Very High Resolution Radiometer), SPOT-5 e CCD/CBERS-2 (Charge-Coupled Detector / China-Brasil Earth Resources Satellite), Landsat ETM+ e TERRA/ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emissão e Reflexão Radiometer) sensores que foram simulados a partir de dados com filtros do Hyperion. Os resultados destes autores corroboram com os vistos nesta pesquisa. Também o MODIS foi simulado pelo FieldSpec, mas como a resolução espectral do sensor terrestre é maior que a do orbital, dentro de uma mesma faixa, estes não correlacionaram-se.

Ponzoni e Shimabukuro (2009), relatam que a reflectância de um dossel vegetal em imagens de satélite apresenta pequenas diferenças em relação a reflectância medida em uma folha isolada. A arquitetura do dossel (ângulo, distribuição, orientação e espaçamento das folhas), teor de pigmentos, conteúdo de água, grau de senescência e estresse nutricional ou ambiental, aos quais as plantas estão submetidas, são os principais fatores que definem a reflectância de um dossel. Na região do espectro visível a reflectância de uma folha apresenta

valores mais altos do que os valores referentes ao dossel. Ao contrário, na região do infravermelho próximo, os valores de reflectância de um dossel são mais altos e ocorre devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética entre as camadas de folhas

Tulip e Wilkins (2005) relataram em seu trabalho sobre a separação espectral da cana e bagaço, bem como a tentativa de determinar se os espectros de misturas de colmo de cana, folhas e dossel poderiam ser usados para examinar as proporções de cobertura de superfície. No trabalho utilizaram a técnica de separação espectral por dois instrumentos diferentes na coleta dos espectros: o espectrômetro portátil UniSpecH e um DevicesH (ASD 2005). Os resultados mostraram que colmos, folhas e dossel foram espectralmente separáveis para a variedade de cana que investigada. Estes autores mostraram que os espectrômetros têm potencial de uso na discriminação da cana. Já neste trabalho, os resultados não confirmaram tal potencial.

De acordo com Batista (2005), a importância da espectrorradiometria de campo se deve ao fato de ela permitir a eliminação do efeito da atmosfera na coleta de dados, uma vez que a distância entre o sensor e o alvo é mínima. Ela permite, também, um perfeito controle dos diversos ângulos de observação, assim como do ângulo de iluminação, eliminando dessa forma, várias fontes de variação na obtenção dos dados de sensoriamento remoto. Além disso, pode-se fazer uma descrição detalhada dos alvos que estão sendo observados, o que permite a construção de uma biblioteca de informações valiosas para a interpretação de alvos detectados e avaliados por outros sistemas sensores. Apesar disto, o sensor não foi capaz de detectar diferença significativa para correlacionar-se com o MODIS.

Os resultados da pesquisa conduzida na África do Sul por Gers (2004) revelou que as aplicações de sensoriamento remoto não substituiria os métodos e procedimentos para mapeamento de área de cana existentes num futuro próximo.

Ante o exposto, os sensores FieldSpec3 e MODIS/TERRA não se mostraram como ferramentas adequadas à detecção de variações na reflectância no ambiente considerado.

Porém, para corroborar os dados é necessário fazer uma análise mais criteriosa com aquisição de dados adicionais para que se possa entender melhor o comportamento espectral da cana-de-açúcar a fim de melhor correlacionar e validar os dados obtidos por Sensoriamento Remoto neste trabalho. Além disso, devem ser conduzidos estudos para correlacionar o comportamento dos IVs ao longo do tempo com a produtividade da cultura e definir qual o melhor momento para utilizar os IVs estimados pelos sensores como suporte para previsão de produtividade.

#### **7.4. CONCLUSÕES**

Relacionando os índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pelos sensores FieldSpec 3 e MODIS/TERRA, não foi possível discriminar variedades de cana-de-açúcar.

A correlação do produto (MOD13) originado do sensor MODIS/TERRA através de radiometria de campo em uma área de cana-de-açúcar com sua produtividade, não foi significativa.

A correlação entre os IVs e a produtividade ocorreu.

Tais constatações indicam ser necessário conduzir estudos mais detalhados com o uso destes sensores para melhor entender o comportamento espectral da cana-de-açúcar.

## 7.5. REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrid) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.13, p. 3753-3767, 2008.
- AYALA-SILVA, T.; BEYL, C.A. Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. **Advantages in Space Research**, Elmsford, v. 35, p. 305-317, 2005
- BATCHELOR, W. D.; BASSO, B.; PAZ, J. O. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 1-2, p. 141-158, Dec. 2002.
- BENVENUTI, F.A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. Campinas, SP: [s.n.], 2005. Dissertação (Mestrado). 120p.
- BRANDELERO, C; BERRA, E.F.; BACKES, K.S.; PEREIRA, R.S.; BRUN, E.J. Espectrorradiometria na região do visível e do infravermelho próximo em povoamento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 215-222, jan.-mar., 2012.
- CASAGRANDE, A. A. 1991. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 157p.
- CEZAR, E. **Avaliação das características químicas e do comportamento espectral da Torta de Filtro/Matéria Orgânica / Vinhaça por meio da espectrorradiometria difusa**. Maringá, 2012. 178p. Tese (Doutorado)
- EPIPHANIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B. F.T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, jun., 1996.
- FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; NANINI, M.R.; FORMAGGIO, A.R. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital. **Bragantia**, v. 69, n. 02, p.453-466, 2010.
- FIRMINO, J.L.N.; LIMA, E.A.; GOMES Filho, M.F.; ARAÚJO, P.C. Identificação de impactos ambientais através da análise comparativa do índice de vegetação derivado do satélite Landsat - 5 para a cidade de São João do Rio do Peixe na Paraíba com a precipitação. **Revista Verde** (Mossoró – RN – Brasil) v.4, n.2, p. 17 - 22 abril/junho de 2009.
- Food and Agricultural Organizations of the United Nations – FAO. **Food and Agricultural commodities production**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Acesso em: dez/2012.
- 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, 58: 289-298, dec., 1996.
- GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. Piracicaba, ESALQ, 1997. 118p. Tese (Doutorado).
- HEEGE, H.J.; REUSCH, S.; THIESSEN, E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 9, n. 3, p. 115-131. 2008.

- HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images. **Remote Sensing of Environment**, v.59, n.3, p.440-451, 1997.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 01, p. 195–213, 2002.
- HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, v.34, n.2, p.101-114, 1996.
- JENSEN, J. R. Remote Sensing of Water. In: Remote Sensing of the Environment an earth resource perspective. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000. cap.11, p. 379-406.
- JENSEN, J. R; **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**; tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coord. et al); São José dos Campos, Sp: Parêntese, 2009. 598p.
- JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A. The Moderate Resolution Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global research. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.
- LAURENTINO, M. L.S; SILVA, H.A; SILVA, J.C.B; SANTANA.S.H.C.; MORAIS.Y.C.B.; GALVÍNCIO, J. D. Aplicação dos índices de NDVI e EVI como análise da variação fisionômica da vegetação no Brejo de Altitude de Serra Negra-Bezerros/PE-Brasil. In **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.3182.
- LIRA, V.M.; SILVA, B.B.; NETO, J.D.; FARIAS, M.S.S.; BEZERRA, M.V.C.; FRANCO, E.S.; CENTENO, C.R.M. Análise espectral de índice de vegetação em área irrigada com cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 1, p. 113-120, jan/abr, 2009.
- LIU, W.T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. UNIDERP, Brochura, 1ª Ed., 2006.
- MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 ETM+**. Campinas, SP: [s.n.], 2003. Dissertação (Mestrado).
- MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992.124p.
- MOKHELE, T.A.; AHMED, F.B. Estimation of leaf nitrogen and silicon using hyperspectral remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, Amsterdam, v. 4, p. 18, Nov. 2010.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320p.
- MOREIRA, M. A.; SHIMABUKURO, Y. E. **Cálculo do índice de vegetação a partir do sensor AVHRR**. Capítulo 4, p. 80-101. In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N / Coordenador Nelson Jesus Ferreira. São Paulo, Oficina de Textos, 2004.
- MOREIRA, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 114p. Dissertação (Mestrado) Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

- NANNI, M. R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ, Piracicaba, 2000.
- NANNI, M. R.; OLIVEIRA, R. **Levantamento pedológico detalhado das áreas de produção de cana industrial da cooperativa Cooperval**. Relatório Técnico. 85 p. 2009.
- NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 02, p. 393-407, 2006.
- NOH, H.; ZHANG, Q.; HAN, S.; SHIN, B.; REUM, D. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. **Transactions of the ASAE**, v.48, p.393-401, 2005.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363p.
- PAPA, R. A. **Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectroradiometria, câmera digital e imagem ASTER**. Brasília, 2009. 132 p. Dissertação de Mestrado.
- PELLEGRINO, G. Q. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. Campinas, SP: [s.n.], 2001. Tese (Doutorado).
- PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, p.21-22, 2002.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007. 127 p.
- PONZONI, F.J.; SHUMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**, São José dos Campos: Ed. A Silva Vieira, 2010, 127p.
- PORTZ, G. **Obtenção de algoritmo agrônômico para sensor foto ativo de refletância vegetal visando à aplicação da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado).
- Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar - PMGCA. **Variedades RB de Cana-de-Açúcar**. CCA/UFSCar. 2008. 31p.
- RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. VAN.; CANTARELLA, H.; et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2: ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p. 233-239. (**Boletim técnico**, 100)
- RAMOS, R. R. D.; LOPES, H. L. ; JUNIOR, J.C.F.M.; CANDEIAS, A.L.B. APLICAÇÃO DO ÍNDICE DA VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) NA AVALIAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS E POTENCIAIS PARA UNIDADES DE CONSERVAÇÃO. In **Anais... III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE**, 27-30 de Julho de 2010 p. 001 – 006.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(12): 1541-1552, 1977.
- ROSENDO, J. DOS SANTOS. J. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do Rio Araguaí – MG utilizando dados do sensor MODIS**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. **Proceedings**. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309- 317.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A. **Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura**. INPE – São Jose dos Campos. 2002.

SHAPIRO, S. S; WILK , M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v .52, n.2, 1965.

SILVA, C. A. V.; DA SILVA, H. A.; OLIVEIRA, T.H.; GALVINCIO, J.D. Uso do Sensoriamento Remoto através de Índices de Vegetação NDVI, SAVI e IAF na microrregião de Itamaracá – PE. In **Anais...** XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 3079-3085.

SILVA, E.M.; MARANGON, G.P.; Dessbesell, L.; Morais, W.W.; Lippert, D.B.; Pereira, R.S. Caracterização espectral na reflectância de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 285 - 292, abr./jun. 2012.

STRENNER, M. Comparison of diferent vegetation indices and their suitability to describe N-uptake in whinter wheat for precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 10, 2010, Denver. Denver: Colorado State University, 2010.

TISOT, D. A. **Modelos de transferência radiativa no estudo da concentração de clorofila em cana-de-açúcar, utilizando dados hiperespectrais**. São José dos Campos: INPE, 2009. 112p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto).

XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; BERKA, L.M.S.; MOREIRA, M.A. Multitemporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p.755-768, 2006.

ZANZARINI, F.V.; PISSARRA, T.C.T.; BRANDÃO, F.J.C.; TEIXEIRA, D.D.B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n.6, p.608–614, 2013.