

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS AVHRR/NOAA  
NO APOIO À ESTIMATIVA OPERACIONAL DA PRODUÇÃO DA  
CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO**

**CRISTINA RODRIGUES NASCIMENTO**

CAMPINAS  
FEVEREIRO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS AVHRR/NOAA  
NO APOIO À ESTIMATIVA OPERACIONAL DA PRODUÇÃO DA  
CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Tese de doutorado submetido à banca examinadora para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

**CRISTINA RODRIGUES NASCIMENTO**

**Orientador: Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior**

CAMPINAS  
FEVEREIRO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

N17u Nascimento, Cristina Rodrigues  
Utilização de séries temporais de imagens  
AVHRR/NOAA no apoio à estimativa operacional da  
produção da cana-de-açúcar no estado de São Paulo /  
Cristina Rodrigues Nascimento. --Campinas, SP: [s.n.],  
2010.

Orientador: Jurandir Zullo Junior.  
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Análise de séries temporais. 2. Análise harmônica.  
3. Processamento de imagens. 4. Cana-de-açúcar. I.  
Zullo Junior, Jurandir. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.  
Título.

Título em Inglês: Use of time series of AVHRR / NOAA in support of  
operational estimates of production of cane sugar in the state of  
São Paulo

Palavras-chave em Inglês: Analysis of time series, Harmonic analysis, Image  
processing, Sugar cane

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

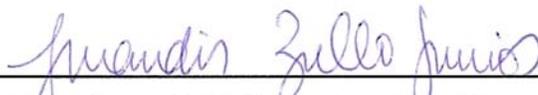
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Carlos Antonio Oliveira Vieira, Geber Barbosa de  
Albuquerque Moura, Maria Angela Fagnani, Luís Henrique  
Antunes Rodrigues

Data da defesa: 11/02/2010

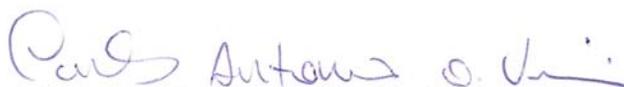
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Cristina Rodrigues Nascimento**, aprovada pela Comissão Julgadora em 11 de fevereiro de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



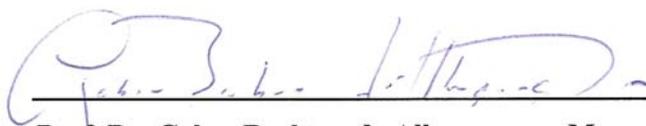
---

**Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior – Presidente e Orientador  
Feagri/Unicamp**



---

**Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira - Membro Titular  
UFV**



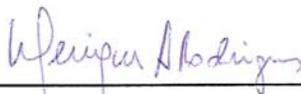
---

**Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura - Membro Titular  
UFRPE**



---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Angela Fagnani - Membro Titular  
Feagri/Unicamp**



---

**Prof. Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues - Membro Titular  
Feagri/Unicamp**

*À*

*Maria de Lourdes Rodrigues Nascimento*

*José Ivanildo do Nascimento*

*Cléssia Virgília Rodrigues Nascimento*

*Guilherme Rodrigues Nascimento*

*Fábio Eduardo Brunialti*

***Dedico.***

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao professor Dr. Jurandir Zullo Junior, pela compreensão, dedicação, convivência e orientação ao longo de todo o período de pós-graduação, o que certamente irá influenciar positivamente a minha vida profissional.

Ao CEPAGRI, pelo suporte técnico durante o desenvolvimento da pesquisa. A toda equipe de profissionais e técnicos pela amizade, aprendizado compartilhado e aperfeiçoamento. Em especial as amigas Daniela Oliveira, Renata Gonçalves e Gláucia Ramirez.

À Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI, pela estrutura e aperfeiçoamento profissional. À coordenação de pós-graduação: Ana Paula Montagner, Marta Vechi e Alexandre D'Ávila, pela atenção.

Aos pesquisadores Dr. Manoel Araújo Sousa (INPE), Dr. Sílvia Pardi Lacruz (UFSM) e ao M.Sc. John Maurício Toledo (INPE) pela ajuda compartilhada na fase inicial da pesquisa.

Aos participantes da banca de qualificação: Prof. Dr. Luís Henrique Antunes Rodrigues e Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino, pelas críticas e sugestões.

À Pesquisadora Luciana Alvim Romani (EMBRAPA/Informática Agropecuária), pelo suporte técnico, no processamento das imagens, aprendizado e companheirismo.

À meu querido irmão Guilherme Rodrigues do Nascimento pela ajuda compartilhada, nos momento finais do trabalho.

A todos que participaram de uma forma direta ou indireta no desenvolvimento do trabalho.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS .....  | IX        |
| LISTA DE TABELAS.....   | XIII      |
| LISTA DE ABREVIATURAS .....   | XV        |
| RESUMO .....  | XVI       |
| ABSTRACT .....  | XVII      |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2.1 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1.1 HISTÓRICO E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR .....   | 4         |
| 2.1.2 CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR.....   | 6         |
| 2.1.3 FATORES AMBIENTAIS INFLUENTES NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....   | 8         |
| <b>2.2 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DE ÁREAS AGRÍCOLAS .....</b>  | <b>9</b>  |
| 2.2.1 MONITORAMENTO DE CULTURAS AGRÍCOLAS A PARTIR DE IMAGENS AVHRR/NOAA  | 10        |
| 2.2.2 UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI NO ACOMPANHAMENTO DO DESENVOLVIMENTO DA VEGETAÇÃO .....                           | 14        |
| 2.2.3 ESTUDOS DE SÉRIES MULTITEMPORAIS UTILIZANDO IMAGENS NDVI/AVHRR.....   | 15        |
| <b>2.3 ESTUDOS DE SÉRIES TEMPORAIS .....</b>  | <b>17</b> |
| 2.3.1 SÉRIES TEMPORAIS .....  | 17        |
| 2.3.2 TÉCNICAS DE ESTUDOS DE SÉRIES TEMPORAIS – ANÁLISE ESPECTRAL .....   | 18        |
| 2.3.3 ANÁLISE HARMÔNICA .....   | 19        |
| 2.3.4 ANÁLISE HARMÔNICA: IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS .....   | 21        |
| 2.3.5 CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS BASEADAS NOS RESULTADOS DOS TERMOS HARMÔNICOS.....   | 22        |
| 2.3.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA CLASSIFICAÇÃO.....  | 25        |
| <b>2.4 ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DE SAFRAS AGRÍCOLAS .....</b>  | <b>26</b> |
| 2.4.1 MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA.....  | 26        |
| 2.4.2 MODELO MATEMÁTICO: MODELO FENOLÓGICO-ESPECTRAL.....   | 28        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>   | <b>31</b> |
| <b>3.1. PRIMEIRA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR ATRAVÉS DA EXPLORAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS AVHRR/NOAA ..</b> | <b>32</b> |
| 3.1.1 SELEÇÃO DAS IMAGENS: ÁREA DE ESTUDO .....   | 33        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.1.2      | GEORREFERENCIAMENTO DAS IMAGENS AVHRR/NOAA E GERAÇÃO DAS IMAGENS NDVI NO PROGRAMA NAVPRO (NAVIGATION PRODUCTS) .....                | 34        |
| 3.1.3      | GERAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES MENSAIS (MVC) DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDVI.....  | 36        |
| 3.1.4      | ANÁLISE HARMÔNICA E IDENTIFICAÇÃO DOS PIXELS COM POTENCIAL DE PERTENCEREM À CLASSE CANA-DE-AÇÚCAR .....                             | 38        |
| 3.1.5      | CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DAS COMPOSIÇÕES RGB DERIVADAS DOS TERMOS HARMÔNICOS.....   | 39        |
| 3.1.6      | REFERÊNCIA E/OU PONTOS DE CONTROLE: VETORES DE CANA-DE-AÇÚCAR.....  | 40        |
| 3.1.7      | EXATIDÃO DA CLASSIFICAÇÃO GERADA A PARTIR DA ANÁLISE HARMÔNICA .....  | 42        |
| 3.1.8      | CÁLCULO DAS ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS .....   | 43        |
| 3.1.8.1    | <i>Estimativa da área de cana-de-açúcar de referência por meio da matriz de erro.</i><br>.....                                      | 44        |
| 3.1.8.2    | <i>Estimativa da área de cana-de-açúcar de referência por expansão direta</i> .....   | 46        |
| <b>3.2</b> | <b>SEGUNDA ETAPA: AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE O NDVI, DIAS APÓS O CORTE (D) E PRODUTIVIDADE.</b> .....                            | <b>47</b> |
| 3.2.1      | SELEÇÃO DAS ÁREAS-TESTES VISANDO À DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE .....  | 48        |
| 3.2.2      | EXTRAÇÃO DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI DOS MUNICÍPIOS ANALISADOS E DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO “DIAS APÓS O CORTE - TERMO D” .....       | 48        |
| 3.2.3      | DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DOS MUNICÍPIOS SELECIONADOS .....   | 48        |
| 3.2.4      | VIA MODELO ESPECTRAL-FENOLÓGICO .....   | 48        |
| 3.2.5      | VIA ESTIMATIVAS REALIZADAS POR ÓRGÃOS OFICIAIS: IBGE.....   | 48        |
| 3.2.6      | CÁLCULO DA DIFERENÇA RELATIVA (%): COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE PRODUTIVIDADE DO MODELO E A PRODUTIVIDADE OFICIAL – IBGE..... | 49        |
| <b>3.3</b> | <b>ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS DADOS</b> .....  | <b>49</b> |
| 3.3.1      | ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....   | 50        |
| 3.3.2      | ANÁLISE DE REGRESSÃO .....  | 50        |
| <b>4.</b>  | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | <b>51</b> |
| <b>4.1</b> | <b>PRIMEIRA ETAPA: SELEÇÃO E PROCESSAMENTO DA SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS NDVI/AVHRR</b> .....  | <b>52</b> |
| <b>4.2</b> | <b>SEGUNDA PARTE: APLICAÇÃO DO ALGORITMO DA ANÁLISE HARMÔNICA NA SÉRIE DE IMAGENS MVC/NDVI</b> .....                                | <b>53</b> |
| 4.2.1      | ANÁLISE HARMÔNICA DA SÉRIE DE IMAGENS MVC/NDVI .....  | 53        |
| 4.2.2      | ANÁLISE HARMÔNICA - SAFRA 03/04 .....   | 54        |
| 4.2.2.1    | <i>Imagens Amplitude e Variância - Safra 03/04</i> .....  | 54        |
| 4.2.2.2    | <i>Imagens Fase e Termo Aditivo - Safra 03/04</i> .....   | 56        |
| 4.2.3      | ANÁLISE HARMÔNICA - SAFRA 04/05 .....   | 58        |
| 4.2.3.1    | <i>Imagens Amplitude e Variância- Safra 04/05</i> .....   | 58        |
| 4.2.3.2    | <i>Imagens Fase e Termo Aditivo - Safra 04/05</i> .....   | 59        |
| 4.2.4      | ANÁLISE HARMÔNICA - SAFRA 05/06 .....   | 62        |
| 4.2.4.1    | <i>Imagens Amplitude e Variância - Safra 05/06</i> .....  | 62        |
| 4.2.4.2    | <i>Imagens Fase e Termo Aditivo - Safra 05/06</i> .....   | 63        |
| 4.2.5      | ANÁLISE HARMÔNICA - SAFRA 06/07 .....   | 66        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 4.2.5.1    | <i>Imagens Amplitude e Variância - Safra 06/07</i> .....   | 66         |
| 4.2.5.2    | <i>Imagens Fase e Termo Aditivo- Safras 06/07</i> .....  | 68         |
| 4.2.6      | ANÁLISE HARMÔNICA - SAFRA 07/08 .....  | 70         |
| 4.2.6.1    | <i>Imagens Amplitude e Variância: Safra 07/08</i> .....  | 70         |
| 4.2.6.2    | <i>Imagens Fase e Termo Aditivo: Safra 07/08</i> .....   | 71         |
| 4.2.7      | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS TERMOS HARMÔNICOS: AMPLITUDE, VARIÂNCIA E TERMO ADITIVO .....  | 74         |
| 4.2.8      | IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR A PARTIR DA RESPOSTA DA ANÁLISE HARMÔNICA NA SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS MVC/NDVI ..... | 76         |
| 4.2.9      | CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DAS IMAGENS COMPOSIÇÃO RGB .....  | 82         |
| 4.2.9.1    | <i>Classificação supervisionada: algoritmo MAXVER</i> .....  | 82         |
| 4.2.9.2    | <i>Estimativa de área de referência por meio de Matriz de erro e Expansão direta.</i> .....                                      | 87         |
| <b>4.3</b> | <b>TERCEIRA ETAPA: AVALIAÇÃO/APLICAÇÃO DO MODELO FENOLÓGICO-ESPECTRAL NA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR. ....</b> | <b>96</b>  |
| 4.3.1      | PERFIL TEMPORAL DO NDVI PARA OS MUNICÍPIOS SELECIONADOS AO LONGO DAS DIFERENTES SAFRAS UTILIZADAS .....                          | 96         |
| 4.3.2      | ANÁLISE ESTATÍSTICA .....  | 104        |
| 4.3.2.1    | <i>Análise estatística: Modelo 1_MédiaSafras</i> .....   | 105        |
| 4.3.2.2    | <i>Análise estatística: Modelo 2_MédiaMunicípio</i> .....  | 106        |
| <b>5.</b>  | <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>108</b> |
| <b>6.</b>  | <b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>   | <b>110</b> |
| <b>7.</b>  | <b>ANEXOS .....</b>  | <b>120</b> |
| 7.1        | COMPOSIÇÕES NDVI/MVC: SAFRA 03/04 .....  | 120        |
| 7.2        | COMPOSIÇÕES NDVI/MVC: SAFRA 04/05 .....  | 121        |
| 7.3        | COMPOSIÇÕES NDVI/MVC: SAFRA 05/06 .....  | 122        |
| 7.4        | COMPOSIÇÕES NDVI/MVC: SAFRA 06/07 .....  | 123        |
| 7.5        | COMPOSIÇÕES NDVI/MVC: SAFRA 07/08 .....  | 124        |
| 7.6        | IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS: SAFRA 03/04 .....   | 125        |
| 7.7        | IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS: SAFRA 04/05 .....   | 126        |
| 7.8        | IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS: SAFRA 05/06 .....   | 127        |
| 7.9        | IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS: SAFRA 06/07 .....   | 128        |
| 7.10       | IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS: SAFRA 07/08 .....   | 129        |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1. CURVA DE CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE 12 E 18 MESES. (ADAPTADO DE ALFONSI ET AL., 1987; GLERIANI, 2005).....   | 7  |
| FIGURA 2. HORÁRIOS LOCAIS DAS PASSAGENS DOS SATÉLITES NOAA NO EQUADOR. ....  | 11 |
| FIGURA 3. PASSAGEM DO AVHRR/NOAA-16 DE 23/08/2006 ÀS 16:56:51GMT, COMPOSIÇÃO RGB=121. ....   | 13 |
| FIGURA 4. COMPOSIÇÃO DE NDVI DO MÊS DE ABRIL DE 2007 (A) E AGOSTO DE 2007 (B). OS TONS MAIS PRÓXIMOS DO VERMELHO CORRESPONDEM A VALORES MAIS ELEVADOS DE NDVI ENQUANTO QUE OS MAIS PRÓXIMOS DO VERDE REPRESENTAM VALORES MAIS BAIXOS, CONFORME A ESCALA. ....  | 15 |
| FIGURA 5. CURVA DE CO-SENO REPRESENTANDO O PRIMEIRO HARMÔNICO (A); CURVAS PARA OS PRIMEIROS TRÊS HARMÔNICOS (B); CURVA RESULTANTE DA SOMATÓRIA DOS TRÊS HARMÔNICOS (C). FONTE: MODIFICADO DE JAKUBAUSKAS ET AL. (2001).....  | 21 |
| FIGURA 6. REPRESENTAÇÃO DO TERMO “D” PARA O MUNICÍPIO DE ARARAQUARA, AO LONGO DAS SAFRAS 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 E 07/08. OS MESES DE MARÇO/ABRIL E SETEMBRO/OUTUBRO REPRESENTAM, RESPECTIVAMENTE, OS PONTOS DE MÁXIMO E MÍNIMO CRESCIMENTO VEGETATIVO DA CULTURA. ....                                     | 29 |
| FIGURA 7. FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA NA IDENTIFICAÇÃO DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR BASEADO NA SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS NDVI/AVHRR NO ESTADO DE SÃO PAULO. ....  | 32 |
| FIGURA 8. COMPOSIÇÃO RGB – 321 – NOAA-17 DO DIA 27/05/2006, 13:04:45 (GMT), MOSTRANDO OS LIMITES GEOGRÁFICOS DA ÁREA DE ESTUDO.....  | 33 |
| FIGURA 9. EXEMPLOS DE IMAGENS EXCLUÍDAS NO PROCESSO DE GERAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE MÁXIMO VALOR DO NDVI/MVC. ....   | 37 |
| FIGURA 10. ÁREA DE ESTUDO, COM DESTAQUE PARA A COBERTURA ESPACIAL DA CENA 220/75 LANDSAT-7, SENSOR ETM+, UTILIZADA PARA GERAÇÃO DOS VETORES DE CANA-DE-AÇÚCAR NA SAFRA 2002/2003. ....   | 40 |
| FIGURA 11. COMPOSIÇÃO COLORIDA FALSA COR RGB-453 DA CENA 220/75, LANDSAT-7, SENSOR ETM+, DO DIA 03/10/2002 (A) E MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM CANA-DE-AÇÚCAR (B), OBTIDO PELO PROJETO CANASAT/INPE PARA A SAFRA 05/06 (B).....   | 41 |
| FIGURA 12. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS MUNICÍPIOS SELECIONADOS PARA AVALIAÇÃO DO MODELO FENOLÓGICO-ESPECTRAL UTILIZADO. EM ORDEM NUMÉRICA: ARARAQUARA (1), ARARAS (2), CRAVINHOS (3), GUATAPARÁ (4), JABOTICABAL (5), PITANGUEIRAS (6), LUÍS ANTÔNIO (7), PONTAL (8), RIBEIRÃO PRETO (9), SERTÃOZINHO (10). .... | 42 |
| FIGURA 13. PONTOS AMOSTRAIS, SELECIONADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ÁREA COM CANA-DE-AÇÚCAR, PARA O MUNICÍPIO ARARAQUARA.....   | 43 |
| FIGURA 14. METODOLOGIA ADOTADA NA OBTENÇÃO DA PRODUTIVIDADE ATRAVÉS DO MODELO FENOLÓGICO-ESPECTRAL PROPOSTO POR PELLEGRINO (2001) E POSTERIOR COMPARAÇÃO COM ESTIMATIVAS OFICIAIS – IBGE.....  | 47 |
| FIGURA 15. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO PRIMEIRO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 03/04. ....  | 55 |
| FIGURA 16. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO SEGUNDO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 03/04. ....   | 55 |
| FIGURA 17. PERFIL TEMPORAL DOS PIXELS, COM CANA-DE-AÇÚCAR, PARA A SAFRA 03/04. ....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 18. CURVA DE AJUSTE DOS VALORES DO NDVI (A) E PORCENTAGEM DE INFORMAÇÃO (B),<br>CORRESPONDENTE ÀS IMAGENS VARIÂNCIA PARA CADA HARMÔNICO, DA SAFRA 03/04.....                                      | 57 |
| FIGURA 19. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO SEGUNDO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA<br>DA CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 04/05. ....  | 58 |
| FIGURA 20. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO TERCEIRO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA<br>DA CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 04/05. ....   | 59 |
| FIGURA 21. PERFIL TEMPORAL DOS PIXELS, COM CANA-DE-AÇÚCAR, PARA AS SAFRAS 03/04 E<br>04/05.....  | 60 |
| FIGURA 22. CURVA DE AJUSTE DOS VALORES DO NDVI (A) E PORCENTAGEM DE INFORMAÇÃO (B),<br>CORRESPONDENTE AS IMAGENS VARIÂNCIA PARA CADA HARMÔNICO, DAS SAFRAS 03/04 E<br>04/05.....                         | 61 |
| FIGURA 23. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO TERCEIRO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA<br>DA CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 05/06. ....   | 62 |
| FIGURA 24. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO QUARTO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA<br>CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 05/06. ....   | 63 |
| FIGURA 25. PERFIL TEMPORAL DOS PIXELS, COM CANA-DE-AÇÚCAR, PARA AS SAFRAS 03/04,<br>04/05 E 05/06. ....  | 64 |
| FIGURA 26. CURVA DE AJUSTE DOS VALORES DO NDVI (A) E PORCENTAGEM DE INFORMAÇÃO (B),<br>CORRESPONDENTE AS IMAGENS VARIÂNCIA PARA CADA HARMÔNICO, DAS SAFRAS 03/04,<br>04/05 E 05/06. ....                 | 65 |
| FIGURA 27. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO QUARTO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA<br>CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 06/07.....  | 67 |
| FIGURA 28. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO QUINTO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA<br>CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 06/07.....  | 67 |
| FIGURA 29. PERFIL TEMPORAL DOS PIXELS, COM CANA-DE-AÇÚCAR, PARA AS SAFRAS 03/04,<br>04/05, 05/06 E 06/07. ....   | 68 |
| FIGURA 30. CURVA DE AJUSTE DOS VALORES DO NDVI (A) E PORCENTAGEM DE INFORMAÇÃO (B),<br>CORRESPONDENTE AS IMAGENS VARIÂNCIA PARA CADA HARMÔNICO, DAS SAFRAS 03/04,<br>04/05, 05/06 E 06/07. ....          | 69 |
| FIGURA 31. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO QUINTO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA<br>CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 07/08.....  | 70 |
| FIGURA 32. AMPLITUDE E HISTOGRAMA DO SEXTO HARMÔNICO DOS PIXELS COM A CULTURA DA<br>CANA-DE-AÇÚCAR TOMADOS COMO REFERÊNCIA, SAFRA 07/08.....   | 71 |
| FIGURA 33. PERFIL TEMPORAL DOS PIXELS, COM CANA-DE-AÇÚCAR, PARA AS SAFRAS 03/04,<br>04/05, 05/06 E 07/08. ....   | 72 |
| FIGURA 34. CURVA DE AJUSTE DOS VALORES DO NDVI (A) E PORCENTAGEM DE INFORMAÇÃO (B),<br>CORRESPONDENTE AS IMAGENS VARIÂNCIA PARA CADA HARMÔNICO, DAS SAFRAS 03/04,<br>04/05, 05/06, 06/07 E 07/08. ....   | 73 |
| FIGURA 35. CURVA ORIGINAL E CURVA AJUSTADA ATRAVÉS DA ANÁLISE HARMÔNICA DO PERFIL<br>TEMPORAL DA SÉRIE MVC/NDVI, DOS CINCO ANOS-SAFRA ANALISADOS. ....   | 74 |
| FIGURA 36. “INTERVAL PLOT” DA IMAGEM AMPLITUDE PARA AS DIFERENTES SAFRAS<br>ANALISADAS, CONSIDERANDO OS HARMÔNICOS DE RESPOSTA DA CANA-DE-AÇÚCAR. ....   | 75 |
| FIGURA 37. MAGNITUDE DOS VALORES DE AMPLITUDE, TERMO ADITIVO E VARIÂNCIA, DOS PIXELS<br>COM CANA-DE-AÇÚCAR, NAS CINCO SAFRAS CONSIDERADAS. ....  | 75 |
| FIGURA 38. COMPOSIÇÃO RGB: R (AMPLITUDE - 1ºHARMÔNICO), G (TERMO ADITIVO) E B (FASE -<br>1ºHARMÔNICO) PARA A SAFRA 03/04 E ESTATÍSTICA DOS TERMOS HARMÔNICOS, DOS PIXELS<br>TOMADOS COMO REFERÊNCIA..... | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 39. COMPOSIÇÃO RGB: R (AMPLITUDE - 2ºHARMÔNICO), G (TERMO ADITIVO) E B (FASE - 1ºHARMÔNICO) PARA A SAFRA 04/05 E ESTATÍSTICA DOS TERMOS HARMÔNICOS, DOS PIXELS TOMADOS COMO REFERÊNCIA..... | 78  |
| FIGURA 40. COMPOSIÇÃO RGB: R (AMPLITUDE - 3ºHARMÔNICO), G (TERMO ADITIVO) E B (FASE - 1ºHARMÔNICO) PARA A SAFRA 05/06 E ESTATÍSTICA DOS TERMOS HARMÔNICOS, DOS PIXELS TOMADOS COMO REFERÊNCIA..... | 79  |
| FIGURA 41. COMPOSIÇÃO RGB: R (AMPLITUDE - 4ºHARMÔNICO), G (TERMO ADITIVO) E B (FASE - 1ºHARMÔNICO) PARA A SAFRA 06/07 E ESTATÍSTICA DOS TERMOS HARMÔNICOS, DOS PIXELS TOMADOS COMO REFERÊNCIA..... | 80  |
| FIGURA 42. COMPOSIÇÃO RGB: R (AMPLITUDE - 5ºHARMÔNICO), G (TERMO ADITIVO) E B (FASE) PARA A SAFRA 07/08 E ESTATÍSTICA DOS TERMOS HARMÔNICOS, DOS PIXELS TOMADOS COMO REFERÊNCIA. ....              | 81  |
| FIGURA 43. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO: SAFRA 03/04.....   | 82  |
| FIGURA 44. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO: SAFRA 04/05.....   | 83  |
| FIGURA 45. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO: SAFRA 05/06.....   | 84  |
| FIGURA 46. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO: SAFRA 06/07.....   | 85  |
| FIGURA 47. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO: SAFRA 07/08.....   | 86  |
| FIGURA 48. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA ÁREA OCUPADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS, SAFRA 03/04.....   | 88  |
| FIGURA 49. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA ÁREA OCUPADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS, SAFRA 04/05.....   | 89  |
| FIGURA 50. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA ÁREA OCUPADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS, SAFRA 05/06.....   | 91  |
| FIGURA 51. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA ÁREA OCUPADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS, SAFRA 06/07.....   | 92  |
| FIGURA 52. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DA ÁREA OCUPADA COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS, SAFRA 07/08.....   | 93  |
| FIGURA 53. PERFIL TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DO NDVI, NAS CINCO SAFRAS, PARA OS MUNICÍPIOS DE ARARAQUARA (A) E ARARAS (B). ....   | 96  |
| FIGURA 54. PERFIL TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DO NDVI, NAS CINCO SAFRAS, PARA OS MUNICÍPIOS DE CRAVINHOS (A) E GUATAPARÁ (B).....  | 96  |
| FIGURA 55. PERFIL TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DO NDVI, NAS CINCO SAFRAS, PARA OS MUNICÍPIOS DE JABOTICABAL (A) E LUÍS ANTÔNIO (B). ....  | 97  |
| FIGURA 56. PERFIL TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DO NDVI, NAS CINCO SAFRAS, PARA OS MUNICÍPIOS DE PITANGUEIRAS (A) E PONTAL (B). ....   | 97  |
| FIGURA 57. PERFIL TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DO NDVI, NAS CINCO SAFRAS, PARA OS MUNICÍPIOS DE RIBEIRÃO PRETO (A) E SERTÃOZINHO (B). ....  | 97  |
| FIGURA 58. “SCATTERPLOT” DO ERRO RELATIVO (%) E DO PARÂMETRO D PARA OS MUNICÍPIOS DE ARARAQUARA (A) E ARARAS (B), NAS CINCO SAFRAS. ....   | 99  |
| FIGURA 59. “SCATTERPLOT” DO ERRO RELATIVO (%) E DO PARÂMETRO D PARA OS MUNICÍPIOS DE CRAVINHOS (A) E GUATAPARÁ (B), NAS CINCO SAFRAS. ....   | 100 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 60. “SCATTERPLOT” DO ERRO RELATIVO (%) E DO PARÂMETRO D PARA OS MUNICÍPIOS DE JABOTICABAL (A) E LUÍS ANTÔNIO (A), NAS CINCO SAFRAS. ....   | 100 |
| FIGURA 61. “SCATTERPLOT” DO ERRO RELATIVO (%) E DO PARÂMETRO D PARA OS MUNICÍPIOS DE PITANGUEIRAS E PONTAL, NAS CINCO SAFRAS. ....  | 100 |
| FIGURA 62. “SCATTERPLOT” DO ERRO RELATIVO (%) E DO PARÂMETRO D PARA OS MUNICÍPIOS DE RIBEIRÃO PRETO E SERTÃOZINHO, NAS CINCO SAFRAS. ....   | 101 |
| FIGURA 63. PERFIL TEMPORAL DO NDVI PARA O MUNICÍPIO DE ARARAQUARA E “SCATTERPLOT” DO ERRO RELATIVO (%). ....  | 101 |
| FIGURA 64. CURVA E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO DA REGRESSÃO PARA O MODELO_1. ....   | 105 |
| FIGURA 65. COMPARAÇÃO DA PRODUTIVIDADE OFICIAL DO IBGE COM AS OBTIDAS A PARTIR DO TERMO “D” A 122 E 132 DIAS. ....  | 106 |
| FIGURA 66. TERMO “D” OBTIDO PELA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO PARA CADA MUNICÍPIO. ....   | 107 |
| FIGURA 67. IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS DA SAFRA 03/04, REPRESENTANDO: IMAGENS AMPLITUDE - 1º HARMÔNICO (A), AMPLITUDE - 2º HARMÔNICO, VARIÂNCIA - 1º HARMÔNICO (C), VARIÂNCIA - 2º HARMÔNICO (D), ÂNGULO FASE (E) E TERMO ADITIVO (F). .... | 125 |
| FIGURA 68. IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS DA SAFRA 04/05, REPRESENTANDO: IMAGENS AMPLITUDE - 1º HARMÔNICO (A), AMPLITUDE - 2º HARMÔNICO, VARIÂNCIA - 1º HARMÔNICO (C), VARIÂNCIA - 2º HARMÔNICO (D), ÂNGULO FASE (E) E TERMO ADITIVO (F). .... | 126 |
| FIGURA 69. IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS DA SAFRA 05/06, REPRESENTANDO: IMAGENS AMPLITUDE - 1º HARMÔNICO (A), AMPLITUDE - 2º HARMÔNICO, VARIÂNCIA - 1º HARMÔNICO (C), VARIÂNCIA - 2º HARMÔNICO (D), ÂNGULO FASE (E) E TERMO ADITIVO (F) ....  | 127 |
| FIGURA 70. IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS DA SAFRA 06/07, REPRESENTANDO: IMAGENS AMPLITUDE - 1º HARMÔNICO (A), AMPLITUDE - 2º HARMÔNICO, VARIÂNCIA - 1º HARMÔNICO (C), VARIÂNCIA - 2º HARMÔNICO (D), ÂNGULO FASE (E) E TERMO ADITIVO (F). .... | 128 |
| FIGURA 71. IMAGENS DOS TERMOS HARMÔNICOS DA SAFRA 07/08, REPRESENTANDO: IMAGENS AMPLITUDE - 1º HARMÔNICO (A), AMPLITUDE - 2º HARMÔNICO, VARIÂNCIA - 1º HARMÔNICO (C), VARIÂNCIA - 2º HARMÔNICO (D), ÂNGULO FASE (E) E TERMO ADITIVO (F). .... | 129 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 1. AUMENTO DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇÚCAR, EM TONELADAS, NOS ÚLTIMOS SEIS ANOS-SAFRA AGRÍCOLAS SUBSEQUENTES.....   | 5   |
| TABELA 2. CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS E RESOLUÇÃO ESPACIAL DO AVHRR/ NOAA.....   | 12  |
| TABELA 3. QUALIDADE DA CLASSIFICAÇÃO ASSOCIADA AOS VALORES DO ÍNDICE KAPPA.....   | 26  |
| TABELA 4. MATRIZ DE ERROS PARA A CLASSE CANA E NÃO CANA.....  | 44  |
| TABELA 5. MATRIZ DE PROPORÇÕES PARA AS CLASSES CANA E NÃO CANA.....   | 45  |
| TABELA 6. NÚMERO DE IMAGENS UTILIZADAS NA GERAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES MENSIS DE MÁXIMO VALOR (MVC/NDVI).....  | 52  |
| TABELA 7. TOTAL DE IMAGENS UTILIZADAS NA COMPOSIÇÃO DOS META-ARQUIVOS DE ENTRADA NO ALGORITMO DA ANÁLISE HARMÔNICA E HARMÔNICOS RESULTANTES.....  | 53  |
| TABELA 8. MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS TERMOS HARMÔNICOS ANALISADOS, PARA OS CINCO ANOS-SAFRAS CONSIDERADOS NO ESTUDO.....   | 75  |
| TABELA 9. TERMOS HARMÔNICOS DE RESPOSTA DA CULTURA PARA CADA ANO-SAFRA UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO RGB.....  | 76  |
| TABELA 10. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR DA IMAGEM COMPOSIÇÃO COLORIDOS RGB – SAFRA 03/04.....  | 77  |
| TABELA 11. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR DA IMAGEM COMPOSIÇÃO COLORIDOS RGB – SAFRA 04/05.....  | 78  |
| TABELA 12. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR DA IMAGEM COMPOSIÇÃO COLORIDOS RGB – SAFRA 05/06.....  | 79  |
| TABELA 13. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR DA IMAGEM COMPOSIÇÃO COLORIDOS RGB – SAFRA 06/07.....  | 80  |
| TABELA 14. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS PIXELS COM CANA-DE-AÇÚCAR DA IMAGEM COMPOSIÇÃO COLORIDOS RGB – SAFRA 07/08.....  | 81  |
| TABELA 15. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA, EM HECTARES, DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A SAFRA 03/04.....  | 87  |
| TABELA 16. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA, EM HECTARES, DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A SAFRA 04/05.....  | 90  |
| TABELA 17. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA, EM HECTARES, DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A SAFRA 05/06.....  | 90  |
| TABELA 18. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA, EM HECTARES, DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A SAFRA 06/07.....  | 92  |
| TABELA 19. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA, EM HECTARES, DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A SAFRA 07/08.....  | 93  |
| TABELA 20. COMPARAÇÃO DE MÉDIA ENTRE AS ESTIMATIVAS DE ÁREA, EM HECTARES, DE TODOS OS MUNICÍPIOS ANALISADOS.....  | 94  |
| TABELA 21. CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) ENTRE A ESTIMATIVA DE ÁREA OFICIAL COM CANA-DE-AÇÚCAR E A ÁREA OBTIDA POR EXPANSÃO DIRETA (ED) E MATRIZ DE ERRO (ME) PARA OS MUNICÍPIOS ESTUDADOS..... | 95  |
| TABELA 22. PRODUTIVIDADE (TON/HA) ESTIMADA A PARTIR DOS DADOS DO IBGE, PARA OS MUNICÍPIOS SELECIONADOS.....   | 99  |
| TABELA 23. RESULTADOS DA MSC MÁXIMA DO CICLO ESTIMADA PELO MODELO E O ERRO RELATIVO (%) NAS DISTINTAS SAFRAS.....   | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 24. RESULTADOS DA MSC MÁXIMA DO CICLO ESTIMADA PELO MODELO E O ERRO RELATIVO (%) NAS DISTINTAS SAFRAS. .... | 103 |
| TABELA 25. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO OBTIDO EM CADA MUNICÍPIO. ....                      | 107 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>AVHRR/NOAA</b> | <i>Advanced Very High Resolution Radiometer/ National Oceanic and Atmospheric Administration</i>  |
| <b>NDVI/MVC</b>   | <i>Normalized Difference Vegetation Index/ Maximum Value Composition/Índice de vegetação da diferença normalizada/ Composição de máximo valor do NDVI</i> |
| <b>CEPAGRI</b>    | <i>Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura</i>  |
| <b>CONAB</b>      | <i>Companhia Nacional de Abastecimento</i>  |
| <b>PROÁLCOOL</b>  | <i>Programa Nacional do Alcool</i>  |
| <b>COPERSUCAR</b> | <i>Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo</i>  |
| <b>EMBRAPA</b>    | <i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i>  |
| <b>GMT</b>        | <i>Greenwich Mean Time/Hora média de Greenwich</i>  |
| <b>FAO</b>        | <i>Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação</i>   |
| <b>IAF</b>        | <i>Índice de Área Foliar</i>  |
| <b>CBERS</b>      | <i>Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres</i>  |
| <b>LANDSAT</b>    | <i>Land Remote Sensing Satellite/Satélite de monitoramento terrestre</i>  |
| <b>MSS</b>        | <i>Multispectral Scanner System / Sistema de varredura multiespectral</i>   |
| <b>GAC</b>        | <i>Global Area Coverage/ Área de cobertura global</i>   |
| <b>IBGE</b>       | <i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>  |
| <b>SIDRA</b>      | <i>Sistema IBGE de Recuperação Automática</i>   |
| <b>HRPT</b>       | <i>High Resolution Picture Transmission /Transmissão de Imagens de Alta Resolução</i>   |
| <b>CCAR</b>       | <i>Colorado Center for Astrodynamics Research/Centro de astrodinâmica da Universidade do Colorado</i>   |
| <b>CANASAT</b>    | <i>Mapeamento da Cana via Imagens de Satélite de Observação da Terra</i>  |
| <b>INPE</b>       | <i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>  |

## RESUMO

O Brasil é líder mundial na fabricação, exportação de açúcar e na produção de álcool. O estado de São Paulo responde por 60% da produção de açúcar e 61% de todo o álcool produzido no país. Em função da alta relevância da produção, é importante que se tenham estimativas e levantamentos seguros das áreas cultivadas com a cultura. O avanço das diferentes técnicas de sensoriamento remoto tem permitido utilizar imagens de satélites para monitorar e auxiliar a estimativa dessas áreas. São inúmeras as opções, entre elas as imagens do sensor AVHRR/NOAA. Aliando a necessidade de obter estimativas mais precisas das safras de cana-de-açúcar, com o potencial de adquirir informações agrícolas da cultura através do NDVI, o presente trabalho explorou a análise de séries temporais das imagens NDVI/AVHRR, na identificação das áreas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. A partir da identificação operacional, foram selecionados municípios com áreas expressivas a fim de testar a viabilidade do uso de um modelo fenológico-espectral, no fornecimento de informações objetivas que possam auxiliar os sistemas de previsão de safras. Os resultados apontam que as áreas com cana-de-açúcar foram bem modeladas, a partir da análise harmônica, nas cinco safras analisadas, permitindo sua diferenciação entre outras culturas, nas composições RGB utilizadas, em função dos respectivos ciclos vegetativos. A partir da classificação supervisionada, utilizando o algoritmo máxima verossimilhança das imagens amplitude, termo aditivo e fase foi gerado um mapa representando a distribuição espacial das áreas com a cultura no estado nos anos-safras 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 e 07/08. Nestes mapas a classe cana-de-açúcar foi representada em função da área ocupada, sendo este parâmetro avaliado a partir de duas metodologias distintas: Expansão direta e Matriz de erro. Os resultados obtidos em cada ano-safra foram comparados com o dado considerado referência, fornecidos pelo projeto CANASAT/INPE. Verificou-se, que os menores erros relativos, em torno de 10% para a safra 07/08, foram encontrados a partir da estimativa baseado na Matriz de erro. Quanto ao modelo fenológico-espectral, a utilização de imagens do AVHRR/NOAA-17 apresentou resultados bastante satisfatórios, possibilitando um aumento da objetividade dos métodos de acompanhamento e previsão de safras. Ao ser aplicado como modelo de crescimento, este apresentou resultados favoráveis para apoio ao acompanhamento e previsão de safra da cultura. A utilização de valores de NDVI do meio do ciclo da cultura gerou melhores resultados quando aplicado nas fórmulas de Massa Seca de Colmos e nas fórmulas de MSC Máxima e Proporcional. O modelo possibilitou um monitoramento mais frequente das condições de campo e a obtenção de resultados de uma maneira mais rápida e objetiva. A equação de regressão, considerando o dia após o corte em torno de 122 a 132 dias, foi a que apresentou resultado melhor na estimativa da produtividade. Devido ao baixo custo de aquisição das imagens, à longevidade do sistema, à abrangência espacial das imagens e à possibilidade de geração de índices a partir de suas bandas espectrais, a utilização de metodologias que envolvam a aplicação da série temporal dessas imagens, é uma ferramenta útil em sistemas operacionais de acompanhamento e previsão de safras.

**Palavras-chave:** Cana-de-açúcar, NDVI, Séries temporais, Análise harmônica, modelo fenológico-espectral e Produtividade.

## ABSTRACT

Brazil is the first world producer of sugar cane. The State of Sao Paulo is the first national producer of sugar cane, contributing with more than 60% of national production. Due to the high relevance of production, it is important to have insurance estimates and surveys of areas cultivated with the crop. The progress of the different remote sensing techniques has allowed to use satellite images to monitor and assist the estimation of these areas. There are numerous options, including images from the AVHRR/NOAA. Combining the need to obtain more precise estimates of the yields of cane sugar, with the potential to acquire agricultural information culture through the NDVI, this study explored the time series analysis of NDVI/AVHRR images and the identification of areas with sugar cane in the State of Sao Paulo. After identifying operational, were selected municipalities with significant areas in order to test the feasibility of using a model phenological-spectral, in providing objective information that can help systems crop forecast. The results indicate that areas with sugar cane are well modeled, from the harmonic analysis, the five crops examined, allowing them to differentiate them from other cultures, the RGB compositions used according to their growing seasons. From the supervised classification using the maximum likelihood algorithm of image amplitude, phase and additive term was generated a map representing the spatial distribution of culture in the state in the crop-season 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 and 07/08. These maps the class sugar cane was represented as a function of the area occupied, and this parameter assessed using two different methodologies: direct expansion and error matrix. The results obtained in each crop-season were compared with a figure regarded as reference, provided by the project CANASAT/INPE. It was found that the smaller relative errors, around 10% for the season 07/08, were found from the estimate based on the error matrix. The phenological-spectral model, the use of time series AVHRR/NOAA-17 showed satisfactory results, allowing an increase in the objectivity of the methods of monitoring and forecasting of seasons. When applied as a model of growth, it showed favorable results to support the monitoring and prediction of crop culture. The use of NDVI values of the middle of the cycle gave better results when applied to formulas of culm dry mass and follow-on MSC Maximum and Proportional. The model allowed a more frequent monitoring of field conditions and obtain results in a more rapid and objective. The regression equation, considering the day after the cut at around 122 to 132 days, showed the best result in the estimation of productivity. Due to the low cost of acquisition of images, the longevity of the system, the spatial extent of images and the possibility of generating indexes based on their spectral bands, using methodologies that involve the application of time series of images, is a tool useful in operating systems for monitoring and forecasting crop.

**Keywords:** Sugar cane, NDVI, time series, harmonic analysis, phenological-spectral model and productivity.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor atual de cana-de-açúcar do mundo. Seus produtos são largamente utilizados na produção de açúcar, álcool combustível e, mais recentemente, biodiesel. A safra agrícola passou de 57,8 milhões de toneladas em 1990/91 para 129,68 milhões de toneladas em 2003/04, enquanto que a área plantada cresceu de 37,8 milhões de hectares para 46,6 milhões de hectares, no mesmo período (MARQUES, 2006).

Apesar da evolução e da importância econômica e social do agronegócio para o Brasil, existe, ainda, uma grande dificuldade em estimar com a precisão e a antecipação necessárias a safra das principais culturas agrícolas do país, o que justifica o estudo e a elaboração de metodologias empregando, por exemplo, técnicas como o sensoriamento remoto.

A agilidade e a disponibilidade de informações precisas podem facilitar a elaboração de estratégias referentes ao armazenamento, comercialização e suporte às decisões (PONTES, 2003). Dentre os vários sistemas orbitais existentes os satélites meteorológicos da série AVHRR/NOAA (*Advanced very high resolution radiometer/National oceanic and atmospheric administration*) têm grande potencial de aplicação em métodos operacionais e objetivos de previsão de safras, pois possibilitam a obtenção de coberturas globais diárias a partir satélites devidamente sincronizados e com resolução temporal de doze horas.

O CEPAGRI (*Centro de pesquisa meteorológica e climática aplicada à agricultura*) opera um sistema de recepção das imagens AVHRR/NOAA desde 1994, totalizando, aproximadamente, 5TB (Terabyte) de dados gravados, de abril de 1995 a outubro de 2009. O tamanho dessa série de imagens tem, sem dúvida, um valor inestimável para as pesquisas na agricultura, devido à diversidade de condições climáticas registradas desde abril de 1995 e à grande evolução da agricultura no país.

A utilização de um grande volume de dados é útil para reduzir as limitações do AVHRR/NOAA quanto à sua resolução espacial, em aplicações de real interesse prático, como o apoio ao acompanhamento e a estimativa de safras agrícolas com maior objetividade e antecipação possível. Além disso, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto com base em sensores com resolução espacial moderada a baixa e frequência temporal alta é fundamental para a obtenção de informações atualizadas de regiões extensas, o que favorece a

procura de pesquisas e o desenvolvimento de novas técnicas de processamento e análise desse tipo de dado (PARDI LACRUZ, 2006).

Um dos produtos derivados dessas imagens é o índice de vegetação NDVI (*Índice de vegetação da diferença normalizada*), utilizado amplamente ao longo de vários anos, e que apresenta correlação com a biomassa, sendo um bom estimador desse parâmetro (DEFRIES et al., 1995; REED et al., 1994; LLOYD, 1990). A disponibilidade de dados diários permite a aquisição frequente do NDVI, possibilitando, a geração de séries temporais desse índice. A partir dessas séries de imagens, é possível gerar perfis temporais descrevendo a condição da biomassa ao longo de todo ciclo fenológico da cultura. A quantificação do perfil temporal, por sua vez, fornece informações que possibilitam o monitoramento do potencial produtivo das lavouras, além de servirem como entrada em sistemas de previsão de safras.

Uma das metodologias que vem sendo estudada em séries de imagens NDVI/AVHRR é a análise harmônica, técnica comumente aplicada a dados meteorológicos, que permite integrar as características temporais das séries de imagens com a informação espacial e espectral da mesma, obtendo assim informações de grande utilidade para a identificação e o monitoramento de áreas naturais e também de atividades antrópicas.

MOODY & JOHNSON (2001) utilizaram as imagens amplitude dos dois primeiros harmônicos de séries NDVI/AVHRR e amostras de campo para a classificação de formações vegetais de savana, florestas e áreas de culturas agrícolas.

AZZALI & MENENTI (2000) mapearam unidades homogêneas de vegetação-solo-clima no Sul da África e concluíram que existe uma relação estreita entre os valores de amplitude do primeiro e do segundo harmônicos com os níveis de aridez que influenciam os tipos de vegetação e a fenologia dos mesmos.

JAKUBAUSKAS et al. (2002b), através da análise dos três primeiros harmônicos de um conjunto de imagens bimensais de NDVI/AVHRR no ano de 1992, conseguiram identificar culturas agrícolas distintas. Os autores utilizaram um mapa de uso e cobertura da terra reamostrado para uma resolução de um quilômetro para identificar os pixels puros que serviram como referência na análise.

Diante do exposto, esse trabalho partiu do problema da subjetividade dos sistemas de monitoramento e previsão de safra para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Partindo-se desse problema, o objetivo geral e os específicos foram definidos considerando a

seguinte hipótese: *“A utilização de informações temporais obtidas a partir de séries de imagens do sensor AVHRR/NOAA-17 pode fornecer subsídios para o mapeamento e/ou identificação das áreas plantadas e a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, tornando os sistemas de monitoramento e previsão de safras da cultura mais objetivos”*.

Para testar essa hipótese, o trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira está relacionada à identificação dos pixels com potencial de corresponderem a plantios de cana-de-açúcar, através do resultado da aplicação da análise harmônica na série temporal de imagens NDVI/AVHRR-17, utilizando técnica de classificação supervisionada. A segunda etapa está relacionada à aplicação e ajuste da equação do modelo matemático, proposto por PELLEGRINO (2001), chamado na pesquisa de fenológico-espectral, para estimar a produtividade da cultura, baseado no estudo do perfil temporal do NDVI/AVHRR-17.

O objetivo geral do trabalho é *Desenvolver uma metodologia que permita auxiliar os sistemas de monitoramento e previsão de safras da cana-de-açúcar na classificação operacional das áreas com a cultura e a estimativa da produtividade em municípios do estado de São Paulo*.

Os objetivos específicos foram assim definidos:

- I. Elaborar um sistema de classificação das áreas de cana-de-açúcar, a partir das imagens amplitude, termo aditivo e fase, resultantes da aplicação da análise harmônica na série temporal de imagens MVC/NDVI, visando a identificação operacional da cultura;*
- II. Avaliar o comportamento produtivo da cana-de-açúcar através da exploração de informações da série temporal de imagens AVHRR/NOAA, em função da resposta do índice de vegetação NDVI;*
- III. Avaliar e ajustar um modelo fenológico-espectral destinado à estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.*

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 *A cultura da cana-de-açúcar***

A cana-de-açúcar é cultivada em todos os estados brasileiros, mas é no estado de São Paulo que se concentra a maioria das lavouras. A importância econômica da cana-de-açúcar é grande, devido à diversidade dos produtos gerados. Atualmente, no caso brasileiro, especial atenção vem sendo dada a produção de álcool combustível para a indústria automobilística. A seguir são apresentadas as principais características relacionadas à cultura levando-se em consideração não só o contexto histórico e importância econômica como também a fenologia e o monitoramento a partir de imagens AVHRR/NOAA.

#### **2.1.1 *Histórico e Importância econômica da cana-de-açúcar***

Originária da Ásia, a cana-de-açúcar é uma *poácea* semi-perene, pertencente ao gênero *Saccharum*. Chegou ao Brasil através de Martim Afonso de Souza que, em 1532, trouxe a primeira muda, iniciando seu cultivo na capitania de São Vicente.

A cana, como é denominada usualmente, é cultivada nas regiões tropicais e subtropicais compreendidas entre as latitudes 35° Norte e Sul, tendo o Brasil como seu maior produtor mundial. Segundo BELIK et al. (1998), o carro-chefe da agroindústria canavieira brasileira, por quatro séculos, foi o açúcar nordestino, sempre se destacando pela sua produção e volume exportado.

Atualmente, as regiões de grande produção nacional estão concentradas em alguns estados do Sudeste e Nordeste do país e no norte do Paraná, sendo o estado de São Paulo o principal produtor nacional, respondendo por cerca de 60% da produção. A Tabela 1 apresenta o aumento da produção brasileira de açúcar nas regiões Norte/Nordeste e Centro/Sul, em seis anos-safra subsequentes. Em 2009, aproximadamente 60,22% do total produzido pelo país está associado à produção de açúcar e cerca de 39,78%, a produção de etanol (NEVES et al.,2009).

**Tabela 1. Aumento da produção brasileira de açúcar, em toneladas, nos últimos seis anos-safra agrícolas subsequentes.**

| <i>Regiões</i>             | <i>Safra</i>      |                   |                   |                   |                   |                   |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                            | <b>03/04</b>      | <b>04/05</b>      | <b>05/06</b>      | <b>06/07</b>      | <b>07/08</b>      | <b>08/09</b>      |
| <i>Norte/Nordeste</i>      | 59.990,02         | 57.392,75         | 48.345,35         | 54.405,52         | 64.609,67         | 48.529,00         |
| <i>Centro/Sul</i>          | 297.120,05        | 324.054,34        | 334.136,64        | 373.912,88        | 431.233,51        | 489.401,12        |
| <b><i>Total Brasil</i></b> | <b>357.110,88</b> | <b>381.447,10</b> | <b>382.482,00</b> | <b>428.318,41</b> | <b>495.843,19</b> | <b>537.930,12</b> |

O aumento da produção da região Centro/Sul do país ocorreu, simultaneamente, com a redução da demanda externa, resultante da crise mundial dos anos 30. No início da década de 70, instaurou-se uma política de concentração e modernização do complexo agroindustrial da cana-de-açúcar, com a criação de vários programas, entre eles, o PROÁLCOOL (*Programa Nacional do álcool*), em 1975, onde num primeiro momento, deu-se ênfase ao aumento da produção do álcool anidro e posteriormente, intensificou-se o uso do álcool hidratado como combustível.

Em 2000, o setor sucroalcooleiro foi inserido em um contexto de livre mercado. A partir dessa data, os preços da cana, do açúcar e do álcool deixaram de ser tabelados e as exportações foram liberadas. Dessa forma, as empresas do setor passaram a depender mais de suas eficiências administrativas e econômicas, face à concorrência mais intensa na colocação de seus produtos finais.

Os produtores e agentes de mercado passaram a conduzir suas ações de acordo com os sinais emitidos por preços determinados em mercados competitivos. Em 2009, os cinco maiores produtores mundiais foram Brasil, Índia, China, Tailândia e EUA (NEVES et al., 2009). O consumo interno de açúcar no Brasil absorve, aproximadamente, cerca de 40% da produção, sendo que 60% dessa parcela representa o consumo final propriamente dito. A baixa expansão do consumo interno e a redução dos estoques mundiais fizeram com que as exportações crescessem de forma significativa, em volume e valor. Em 2005, as exportações de açúcar totalizaram 18,1 milhões de toneladas e uma receita de US\$ 3,9 bilhões. O total das exportações brasileiras de açúcar para a safra, 09/10, foi estimado em 24,3 milhões de toneladas, favorecido como consequência da oferta menor esperada de outros países produtores, principalmente a Índia (USDA, 2009).

No caso do álcool, o mercado interno absorve cerca de 90% da produção. As exportações também apresentaram um crescimento expressivo ao longo dos anos. O total estimado para a produção de etanol, na safra 09/10 foi projetada em 28,45 bilhões de litros (8,5 bilhões de litros de etanol anidro e 19,95 bilhões de litros de etanol hidratado). Este crescimento é impulsionado pelo consumo de etanol. Apesar do mundo ainda estar sobre a influência da crise financeira, a demanda doméstica por etanol em 2009/2010 pode aumentar, devido principalmente às vendas de veículos bicombustíveis e/ou “flex”.

### **2.1.2 Características fisiológicas da cana-de-açúcar**

Sendo a cana-de-açúcar uma planta de metabolismo fotossintético C<sub>4</sub>, ela é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100mg de CO<sub>2</sub> fixado por m<sup>2</sup> de área foliar por hora.

Tal característica é relevante para o desenvolvimento de sistemas bioenergéticos, em função da grande diferença de produtividade entre as plantas C<sub>3</sub> (arroz, trigo, soja, todas as frutíferas, oleaginosas e a maioria dos vegetais conhecidos) quando comparadas as plantas C<sub>4</sub> (milho, cana-de-açúcar, sorgo e outras gramíneas tropicais). Plantas C<sub>4</sub> absorvem mais energia solar, apresentando, ainda ausência de perdas por fotorrespiração, alta eficiência na utilização da água, maior tolerância salina e baixo ponto de compensação para o CO<sub>2</sub>, ou seja, responde melhor sob concentrações menores desse gás (BNDES, 2008).

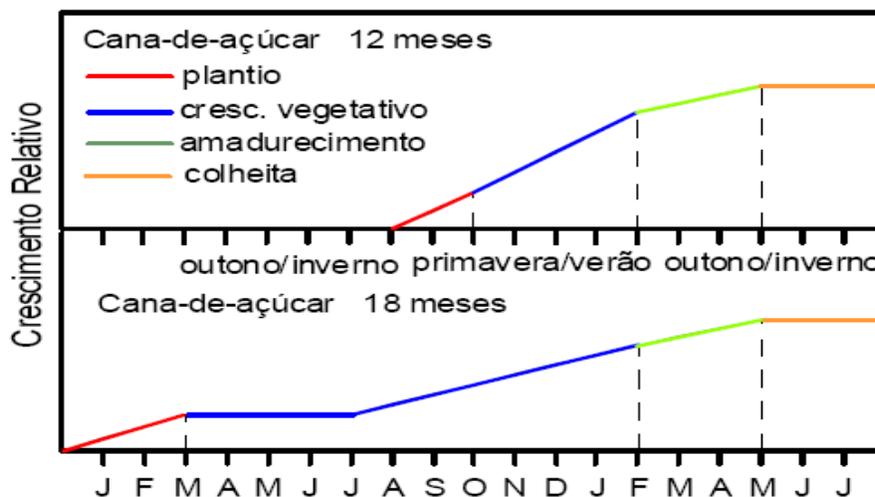
Em síntese, pode-se afirmar que os vegetais com ciclo C<sub>4</sub> são os mais aptos à produção bioenergética. Entretanto, esta alta atividade fotossintética não se correlaciona diretamente com a produtividade elevada de biomassa. A grande capacidade da cana-de-açúcar para a produção de matéria orgânica reside na alta taxa de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, que é influenciado pelo IAF (*Índice de área foliar*). Além disso, o longo ciclo de crescimento da planta resulta em produções elevadas de matéria seca. A cultura da cana-de-açúcar apresenta cinco estádios fenológicos diferentes:

- Primeiro estágio – Brotação e emergência dos colmos.
- Segundo estágio – Perfilhamento e estabelecimento da cultura, fase que vai da emergência dos brotos ao final do perfilhamento.

- Terceiro estágio – Grande crescimento, indo do perfilhamento final à concentração de sacarose.
- Quarto estágio – Maturação, caracterizada pela concentração intensa de sacarose nos colmos.
- Quinto estágio – Reprodutivo (Florescimento), caracterizando-se pela redução do teor de sacarose.

O período de desenvolvimento de cada um desses estágios é diferente para a cana-soca em relação à cana-planta. O primeiro ciclo da cultura, chamado de cana-planta, pode ser de 12 meses (cana de ano) ou 18 meses (cana de ano e meio), conforme ilustrado na Figura 1. Conceitua-se cana-planta como aquela cuja origem está em mudas plantadas e que, posteriormente, terão o primeiro corte. Após o primeiro corte, a cana brota e, nos ciclos sucessivos de corte/brotação, é denominada de cana-soca (GLERIANI, 2005).

Para o estado de São Paulo, há dois períodos de plantio da cana: o primeiro vai de setembro a outubro e a cultura apresenta um ciclo com duração média de 12 meses (cana de ano), no segundo, a cana é plantada de janeiro a março e apresenta ciclo variável que vai de 14 a 21 meses (ano e meio), conforme a época de plantio e a época de maturação da variedade utilizada. No ciclo de ano e meio, a cana passa por um repouso fisiológico (no inverno), sendo cortada no inverno seguinte, aproximadamente. A colheita da cana-de-açúcar inicia-se nos meses de abril/maio e prolonga-se até novembro. Foi considerado no trabalho o ciclo de duração de 12 meses da cultura.



**Figura 1. Curva de crescimento da cana-de-açúcar de 12 e 18 meses. (Adaptado de ALFONSI et al., 1987; GLERIANI, 2005).**

Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as variedades, conhecida como cana-soca. A mesma cana-de-açúcar pode ser colhida cinco ou mais vezes, sendo que, a cada ciclo, devem ser feitos investimentos significativos em insumos e tratamentos culturais para manter a produtividade elevada (UNICA, 2004).

As características varietais (aquelas diretamente relacionadas à variedade plantada) definem o número de colmos, a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento, a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea, sendo a expressão destes caracteres muito influenciados pelo clima, manejo e práticas culturais utilizadas. As características das cultivares influenciam a eficiência fotossintética da cana, além das variações climáticas que prevalecem durante o desenvolvimento da cultura.

As variedades de cana-de-açúcar na região Centro-Sul são divididas em quatro grupos com relação à maturação, ou seja, o período dentro da safra em que atingem o máximo teor de sacarose nos colmos (NUNES JR, 1987):

- G1 = Grupo de variedades de maturação precoce que atingem o máximo teor de sacarose de abril a maio;
- G2 = Grupo de variedades de maturação semi-precoce que atingem o máximo teor de sacarose no final de maio ao início de julho;
- G3 = Grupo de variedades de maturação média que atingem o máximo teor de sacarose do final de julho ao início de outubro;
- G4 = Grupo de variedades de maturação tardia que atingem o máximo teor de sacarose de outubro a novembro.

### **2.1.3 Fatores ambientais influentes na cultura da cana-de-açúcar**

Os fatores ambientais que afetam de maneira marcante a produção de cana-de-açúcar são: temperatura, luz (intensidade) e disponibilidade de água e nutrientes. A cana-de-açúcar desenvolve-se entre temperaturas de 22°C a 30°C, quando apresenta máximo potencial de produção em sua fase vegetativa. O crescimento em temperaturas inferiores a 20°C é muito reduzido e paralisado aos 10°C (BARBIERI et al., 1979).

A quantidade de água exigida pela cultura varia entre 1500mm a 2500mm durante o período de crescimento, porém, para completar o ciclo vegetativo, a cana requer um déficit

hídrico e térmico a fim de acumular sacarose em seus colmos (RUDORFF & BATISTA, 1988). Devido ao início das precipitações, aumento da intensidade luminosa e, também, da temperatura, a fase de maior desenvolvimento da cultura acontece de outubro a abril, com o pico do crescimento de dezembro a abril. Considerando-se esse o grande período de desenvolvimento, pode-se constatar que para a cana-de-ano e a cana-soca, a fase de maior desenvolvimento ocorre na primeira metade do grande período. Já para a cana-de-ano e meio, isto acontece na segunda metade do grande período.

A cultura não é muito exigente em solos, contudo, apresenta desenvolvimento melhor em áreas que tenham aeração e drenagem boas. Quanto ao pH, a cana cresce bem no intervalo de 5,0 a 8,5, sendo que o pH ótimo recomendado encontra-se próximo a 6,5. As recomendações de adubação e calagem para cana-planta e soca são baseadas nos resultados de análises químicas de solos (RUDORFF & BATISTA, 1988).

Na prática, devido a diferentes tipos de solos, a produção pode reagir de maneira bastante diferenciada nos períodos de carência hídrica, principalmente na rebrota das socas. Como exemplo: “Em solos mais argilosos de boa capacidade de retenção hídrica e de porosidade adequada para uma boa movimentação de água no perfil (drenagem e ascensão capilar) observa-se um dano menor, em condição de estiagem pronunciada”.

## **2.2 *Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de áreas agrícolas***

Conhecer, quantificar e monitorar uma atividade dinâmica como a agricultura é um desafio para um país de dimensões continentais como o Brasil. O sensoriamento remoto, com suas características multiespectrais, multitemporais e sinópticas, podem atender essas necessidades fornecendo informações que auxiliem nas tomadas de decisões importantes para o país. Essa característica evidencia seu potencial no acompanhamento das alterações que ocorrem na superfície terrestre ao longo do tempo. Além disso, as imagens permitem a mensuração das características da superfície em bandas distintas, desde a região espectral do visível até o infravermelho. A análise dessas regiões espectrais permite o mapeamento dos diferentes tipos de coberturas do solo, incluindo as culturas agrícolas.

O benefício do sensoriamento remoto orbital à atividade agrícola já havia sido planejado desde as especificações do sensor MSS do programa LANDSAT (STEVEN &

JAGGARD, 1995). Com o lançamento de novos sensores do programa, como o TM e o ETM+, houve aumento do uso das imagens geradas, o que faz da agricultura uma das atividades com maior demanda de dados (JACKSON, 1984; MORAN et al., 1997; ANDERSON et al., 1999).

A utilização de dados de sensoriamento remoto é uma das alternativas para a melhoria da objetividade dos métodos de acompanhamento e previsão de safras, tanto na estimativa da área plantada, quanto da produtividade das culturas agrícolas, pelos seguintes motivos principais:

a) Variedade de sistemas sensores disponíveis atualmente com as mais diversas resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas adequadas para utilização em aplicações agrícolas;

b) Experiência de vários grupos de pesquisa do Brasil no assunto, adquirida após vários anos de trabalho na área;

c) Diminuição dos custos de aquisição e processamento das imagens.

### ***2.2.1 Monitoramento de culturas agrícolas a partir de imagens AVHRR/NOAA***

Dentre os vários sistemas orbitais existentes, os satélites meteorológicos como os da série AVHRR/NOAA têm grande potencial de aplicação em métodos operacionais para acompanhamento e previsão de safras, tanto na estimativa da área plantada quanto da produtividade, pelas seguintes razões principais:

a) Possibilitam a obtenção de coberturas globais diárias a partir de satélites devidamente sincronizados, com resolução temporal de doze horas;

b) Possuem bandas espectrais termais calibradas;

c) Há vários satélites em operação simultânea, ampliando a disponibilidade de imagens;

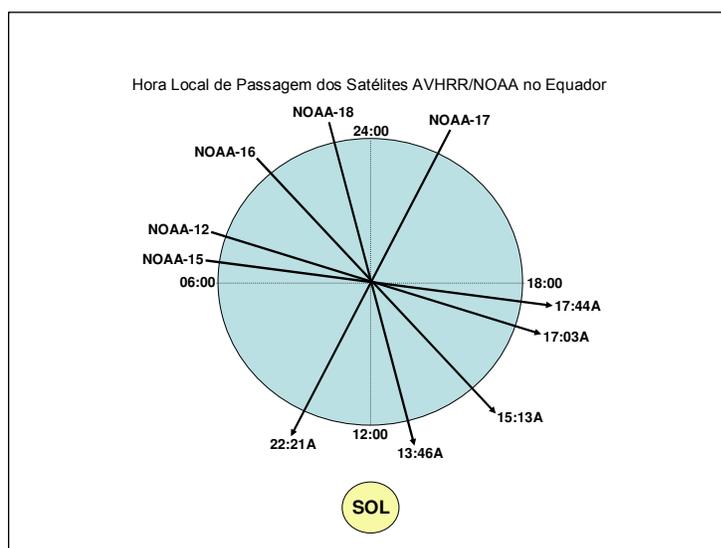
d) Apresentam baixo custo de obtenção dos dados através de estações de recepção de superfície ou da própria NOAA;

e) Longevidade do sistema, em operação desde 11 de dezembro de 1978 (NOAA-1), fazendo com que haja uma vasta literatura sobre o mesmo, sendo reconhecido como um dos sistemas orbitais mais antigos e importantes de observação da Terra já lançados até hoje;

f) Perspectiva de continuidade do sistema por mais alguns anos ainda.

Os satélites da série AVHRR/NOAA operam em órbitas circulares, síncronas com o sol (heliossíncrona), com altitude média de 850km e quase-polares (inclinação média de 98,819°), formando um campo de observação compreendido entre 78° de latitude Norte e 78° de latitude Sul. O tempo necessário para que seja realizada uma volta completa em torno da Terra (período orbital) é de, aproximadamente, 102 minutos, fazendo com que sejam completadas 14,1 órbitas por dia (KIDWELL, 1995).

Cada satélite da série é programado para realizar duas passagens por dia sobre um mesmo local, sendo uma diurna e outra noturna. Isto faz com que a frequência de aquisição de imagens diárias sobre um mesmo ponto na Terra seja elevada, principalmente se vários satélites da série estiverem funcionando bem simultaneamente. Devido à alta resolução temporal, os métodos de monitoramento agrícola em nível global, continental e regional podem ser realizados com o auxílio de imagens diárias geradas a partir dessa plataforma orbitais, embora o satélite tenha sido projetado originalmente para fins meteorológicos, geográficos e ambientais, por proverem a necessária visão sinótica da superfície terrestre. A Figura 2 apresenta um gráfico ilustrando os horários locais das passagens dos satélites no Equador.



**Figura 2. Horários locais das passagens dos satélites NOAA no Equador.**

Os satélites mais recentes possuem seis bandas nas faixas do espectro de radiação eletromagnética com resolução espacial de 1,1km correspondentes ao visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal, segundo descrito na Tabela 2. Cada imagem adquirida cobre uma faixa de, aproximadamente, 2.700km de largura, no solo, sendo que a melhor resolução espacial de um ponto da imagem (pixel) é da ordem de 1,1km nadir, ou seja, mais próximo do centro da imagem.

**Tabela 2. Características espectrais e resolução espacial do AVHRR/ NOAA.**

| <i>Canais</i> | <i>Região do Espectro Eletromagnético</i> |                       |
|---------------|---|-----------------------|
|               | <i>Largura (<math>\mu\text{m}</math>)</i> | <i>Nome</i>           |
| <i>1</i>      | 0,58 – 0,68                               | Visível (Vermelho)    |
| <i>2</i>      | 0,725 – 1,00                              | Infravermelho Próximo |
| <i>3A</i>     | 1,58 – 1,64                               | Infravermelho Próximo |
| <i>3B</i>     | 3,55 – 3,93                               | Infravermelho Médio   |
| <i>4</i>      | 10,3 – 11,3                               | Infravermelho Termal  |
| <i>5</i>      | 11,5 – 12,5                               | Infravermelho Termal  |

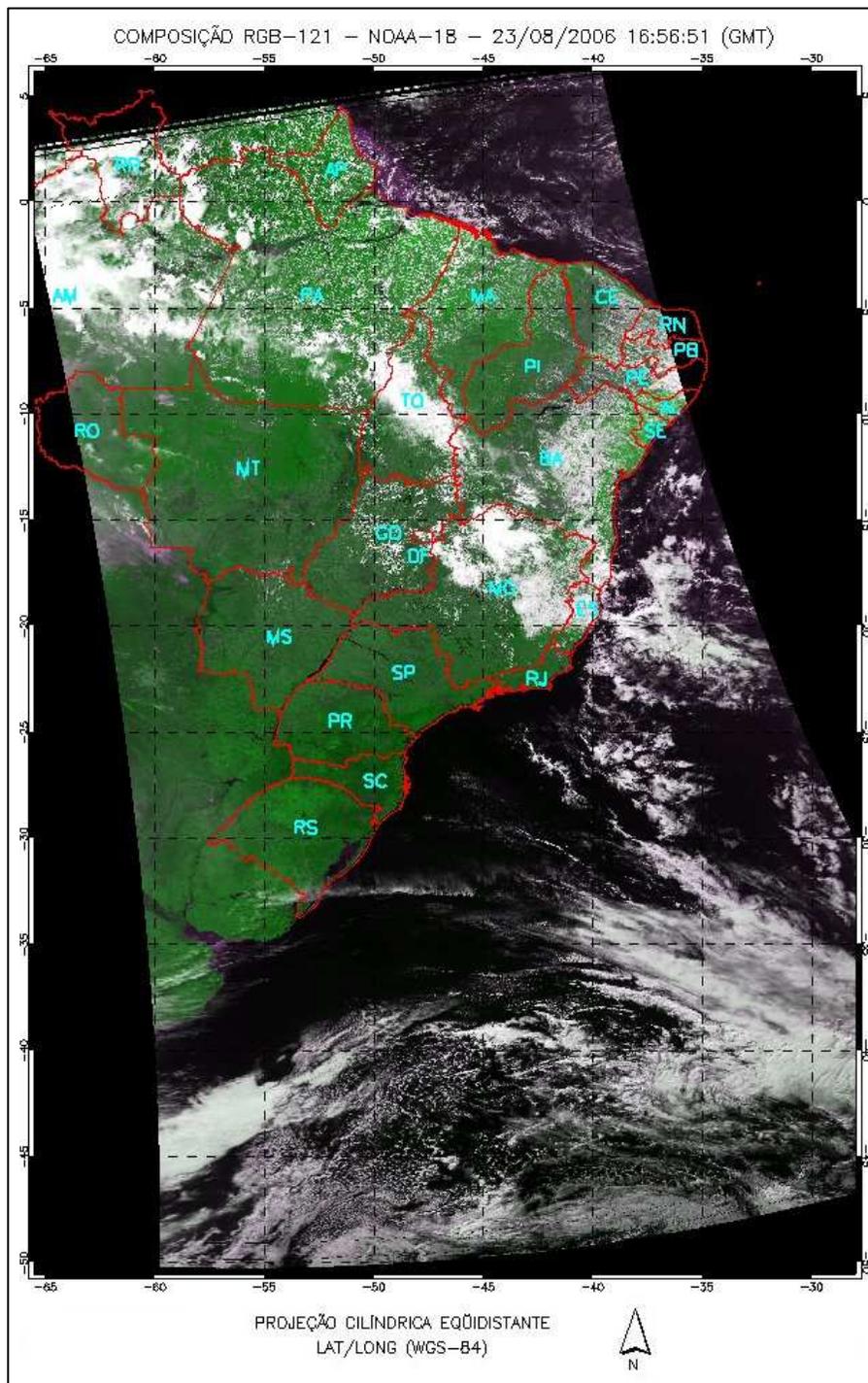
**Fonte: Adaptado de GOODRUM et al.(2001).**

O Cepagri opera um sistema de recepção e tratamento de imagens do satélite meteorológico AVHRR/NOAA desde 1995, possuindo um grande acervo de imagens desse sistema, totalizando, aproximadamente, 50.000 imagens e 5TB de armazenamento em outubro de 2009.

Em dezembro de 2004, esse sistema foi atualizado por um mais moderno, em que todas as operações de recepção foram automatizadas. Além disso, a estação possui uma série de recursos computacionais que são apropriados para a geração de produtos destinados ao monitoramento meteorológico a partir de imagens de satélite.

O tamanho desta série de imagens tem, sem dúvida, um valor inestimável para as pesquisas visando à utilização das imagens do AVHRR/NOAA na agricultura, devido à diversidade de condições climáticas registradas desde abril de 1995. Além disso, foi também um período em que se observou uma grande evolução da agricultura no país, da produtividade

das culturas e da área plantada. A Figura 3 apresenta uma passagem do satélite AVHRR/NOAA-16 sobre o Brasil.



**Figura 3. Passagem do AVHRR/NOAA-16 de 23/08/2006 às 16:56:51GMT, composição RGB=121.**

### ***2.2.2 Utilização de imagens do índice de vegetação NDVI no acompanhamento do desenvolvimento da vegetação***

Grande parte dos sensores remotos orbitais são óticos, operando na faixa de 0,38-15µm do espectro eletromagnético, o qual está subdividido em quatro regiões: visível (azul, verde e vermelho) e infravermelhos próximo, médio e termal. Cada objeto da superfície terrestre, devido à sua composição física e química, apresenta um comportamento espectral particular em relação aos comprimentos de ondas de cada uma dessas regiões.

A vegetação verde sadia tem uma alta refletância na região do infravermelho próximo (0,70 – 1,30µm), devido às características estruturais das folhas e efeitos fenológicos do dossel (GUYOT,1989). Em função dessa característica, muitas combinações entre a refletância dos canais das regiões do vermelho e do infravermelho próximo têm sido propostas. Estas combinações têm sido denominadas de índices de vegetação e compactam as informações dos canais espectrais em um só valor. Segundo BARBOSA (1998), um índice de vegetação ideal minimiza os efeitos variáveis de brilho, enquanto enfatiza variações das medidas decorrentes da variação da densidade de vegetação.

O NDVI é bastante utilizado pela comunidade de sensoriamento remoto por estar diretamente relacionado com a biomassa e cobertura vegetal, sendo também um indicador de fenômenos climáticos de áreas extensas (FELL et al; 2004). Este índice é definido pela Equação (1) e foi proposto por ROUSE et al. (1973), variando de -1,0 a +1,0. YIN & WILLIAMS (1997) discutem o padrão de resposta do NDVI de alguns alvos na superfície terrestre. Nuvens, água e neve têm refletâncias maiores no visível do que no infravermelho, sendo que, nessas condições, o NDVI tem valores negativos.

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

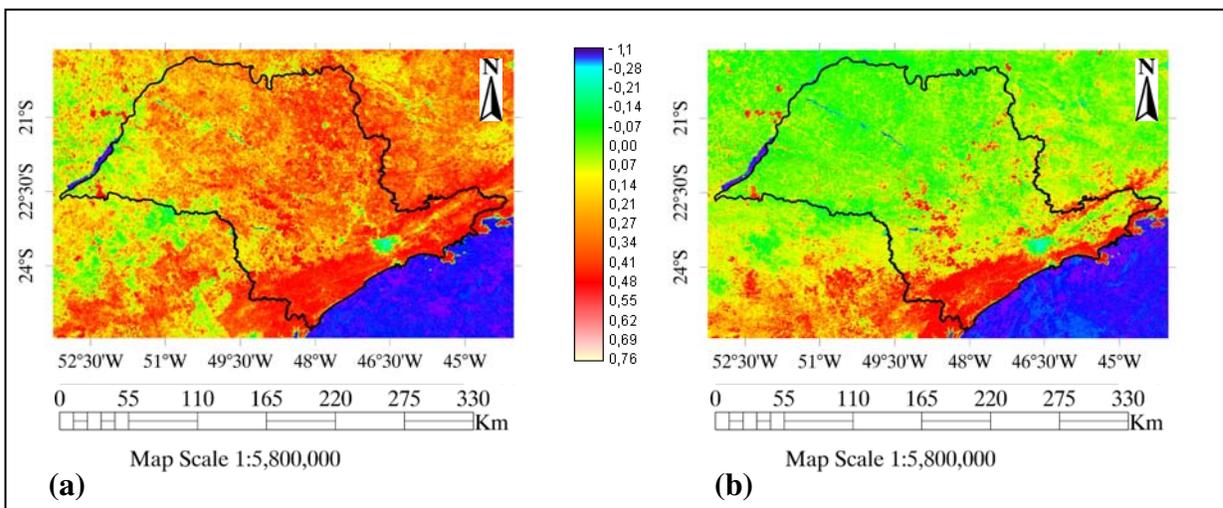
Onde:

$\rho_{IVP}$  = Refletância no canal infravermelho próximo (canal 2) e

$\rho_V$  = Refletância no canal vermelho (canal 1).

Rochas e solos expostos têm refletâncias similares nessas duas bandas e o valor do NDVI é, aproximadamente, zero. Em imagens com vegetação, o NDVI varia de 0,1 a 0,6, sendo que valores mais altos são associados ao maior vigor e densidade da cobertura vegetal

Culturas com plantios extensivos, como a cana-de-açúcar, podem ser estudadas e monitoradas através de imagens do NDVI, como as do AVHRR/NOAA, conforme apresentado na Figura 4.



**Figura 4. Composição de NDVI do mês de abril de 2007 (a) e agosto de 2007 (b). Os tons mais próximos do vermelho correspondem a valores mais elevados de NDVI enquanto que os mais próximos do verde representam valores mais baixos, conforme a escala.**

Os valores de NDVI calculados nas composições mensais, de uma série temporal podem ser de grande utilidade para aumentar a objetividade dos sistemas de acompanhamento e previsão de safras agrícolas se houver correlação entre eles e valores de interesse prático, tais como a produção e a condição climática do período avaliado.

### **2.2.3 Estudos de séries multitemporais utilizando imagens NDVI/AVHRR**

O Grupo de Estudos de Monitoramento, Modelagem e Inventário Global (GIMMS) do GSFC/NASA produz e gerencia um grande conjunto de dados do NDVI, obtidos através de imagens do AVHRR/NOAA. Diversos estudos já foram feitos utilizando esses dados, tal como o de POTTER & BROOKS (1998), que realizaram uma análise global entre a variabilidade

anual do clima e a variabilidade sazonal do NDVI. Além do NDVI, eles utilizaram três índices climáticos (temperatura diária, total de precipitação anual e índice de umidade anual), que juntos explicaram cerca de 70 a 80% das variações geográficas sazonais extremas (máximo e mínimo) de NDVI. As análises foram baseadas na técnica de regressão multilinear e em algoritmos suavizados de Fourier (técnica que foi aplicada para alcançar os objetivos finais do trabalho). Os resultados mostram que as regiões onde o NDVI não apresentou uma boa relação com o clima foram: as de latitudes altas, as que possuem tipos de vegetação mesclados, as que apresentam distúrbios na vegetação e as remotas, onde os dados de estações climatológicas são esparsos.

LIU et al. (1991) utilizaram dados de NDVI obtidos de imagens AVHRR/NOAA, no período de junho de 1981 a agosto 1987 sobre a América do Sul. A evolução mensal do NDVI para anos secos e úmidos do período de estudo foi utilizada para estimar as áreas com cobertura de NDVI menores que 0,23. Esse valor foi utilizado como um indicador de áreas secas e como delimitador de áreas com baixa precipitação no continente. Foram observadas dependências regionais bem definidas, com a variabilidade de áreas secas no nordeste, sudoeste e noroeste do continente e na região amazônica. Isto foi constatado nas áreas com NDVI menores que 0,23 para os anos 1982/83 e 1984/85. Eles verificaram que, na maioria das regiões, o NDVI demora cerca de um mês para responder à precipitação, ou seja, a maior correlação entre o NDVI e a quantidade de precipitação ocorre quando ele é comparado com a precipitação do mês anterior. Esse estudo também mostrou que a distribuição continental da vegetação com estresse, indicada pelo NDVI, corresponde a áreas que sofreram impactos de seca provocados pelo El Niño.

No Brasil, BATISTA et al. (1997) analisaram a composição mensal do NDVI (AVHRR/NOAA) da região amazônica, para o período de agosto de 1981 a junho de 1991. Eles constataram que os tipos de vegetação dominantes podem ser diferenciados, e que é possível identificar variações da cobertura vegetal associadas a variações climáticas. Os tipos de vegetação observados incluíram floresta densa, floresta aberta, floresta de transição, caatinga e dois tipos de cerrado. As composições mensais do NDVI revelaram uma forte sazonalidade no cerrado e, especialmente, na caatinga, enquanto que os demais tipos de cobertura florestal mostraram uma variação pequena através dos anos. As composições anuais de NDVI mostraram uma redução clara nos anos secos. Os resultados obtidos sugerem a

utilização de dados multitemporais do NDVI para caracterização ambiental e identificação de ecossistemas florestais. Os resultados também demonstraram que esses dados devem ser utilizados com precaução, especialmente em relação a interferências atmosféricas, tais como, contaminação por nuvens e erupções vulcânicas, além das mudanças de calibração do sensor, quanto à utilização de séries temporais.

## **2.3 *Estudos de séries temporais***

### **2.3.1 *Séries temporais***

Uma série temporal pode ser definida como um conjunto de observações de uma variável dispostas sequencialmente no tempo (MORETTIN & TOLOI, 2004). Normalmente, as séries temporais são analisadas, a partir de seus movimentos principais descritos como: tendência, ciclo, sazonalidade e variações aleatórias. Podem surgir de diferentes áreas do conhecimento como, por exemplo:

- Meteorologia e Oceanografia: Precipitação, temperatura, velocidade do vento, velocidade e amplitude de correntes marítimas;
- Astrofísica: Curvas de luz de objetos estelares, número de manchas solares, explosões solares observadas em radiofrequência e altas energias;
- Geofísica espacial: Pulsações geomagnéticas e cintilações ionosféricas.

Os objetivos de se realizar análises em séries temporais são variados. Em algumas situações, pode ser, simplesmente, obter previsões sobre valores ou tendências futuras e, em outras, uma investigação da relação entre estruturas de duas ou mais séries. Estes objetivos, em geral, podem ser sintetizados da maneira seguinte:

- Caracterização: Determinar as propriedades da série (padrões de tendência, existência de variação sazonal, regimes não-lineares, auto-correlação, leis de potência);
- Previsão: Prever variações passadas e futuras em relação a uma sequência de medidas;
- Modelagem: Aplicar ferramentas para modelagem matemática e/ou fenomenológica da série;
- Controle de processos: Controle estatístico de processos e qualidade dos dados;
- Comparações: Usar a variação numa série para explicar a variação em outra.

### 2.3.2 *Técnicas de estudos de séries temporais – Análise espectral*

Dentro de uma abordagem clássica para a análise e tratamento de séries temporais, pode-se encontrar metodologias diferentes, sendo que as mais clássicas são as análises da função de auto-correlação e espectral.

A análise espectral ou análise de Fourier é uma das formas mais tradicionais para tratamento de sinais e séries temporais. Essa técnica foi criada por Jean Baptiste Joseph Fourier e publicada em 1822 no seu trabalho intitulado *Théorie Analytique de la Chaleur*. Fourier dedicou-se à resolução das equações diferenciais que regem a transferência de calor utilizando uma técnica de séries de senos e cossenos (Série de Fourier) para resolver seus problemas. Fourier, com sua teoria de análise de frequências, afirmou que qualquer função periódica  $f(x)$  pode ser expressa pela somatória de senos e co-senos. Portanto, representações em séries de Fourier, de funções ou dados, como superposição das funções seno e co-seno, têm sido muito úteis para soluções analíticas e numéricas em análise e tratamentos de sinais.

A transformada de Fourier é um método para decomposição de uma série temporal em domínio de tempo em suas componentes de frequência. Todo sinal em domínio de tempo, não importando o quanto complexo, pode ser separado em componentes senoidais. Como resultado, obtém-se um conjunto de valores  $F(w)$  indicando as componentes de frequência e sua respectiva amplitude.

Nesse sentido, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas a sensores de resolução espacial moderada e frequência temporal elevada é de interesse para a obtenção de informações atualizadas de regiões extensas, dando origem ao desenvolvimento de técnicas de processamento e análise para este tipo de dado.

A análise harmônica, comumente aplicada a séries de dados meteorológicos, apresenta-se como uma técnica que permite integrar as características temporais de séries de imagens com a informação espacial da mesma, obtendo, assim, informações de grande utilidade para o monitoramento de áreas naturais, agrícolas e das atividades antrópicas que se desenvolvem nestas áreas (PARDI LACRUZ, 2006).

### 2.3.3 Análise harmônica

A análise harmônica permite representar, separadamente, as flutuações ou variações em uma série temporal que se originou da adição de uma série de funções seno e co-seno. Estas funções trigonométricas denominam-se harmônicos e são frequências múltiplas da frequência fundamental que é determinada pelo tamanho da série de dados. Segundo WILKS (1995), uma dada série temporal de dados de  $N$  amostras equidistantes de uma variável  $y$ , pode ser representada por uma função harmônica, conforme descrito pela Equação (2).

$$y_i = \bar{y} + \sum_{j=1}^{N/2} C_j \cdot \cos(\omega_j t - \phi_j) \quad \text{Eq.(2)}$$

onde,  $\bar{y}$  representa a média dos valores da série de dados,  $C_j$  a amplitude,  $\omega_j$  a frequência,  $t$  o tempo e  $\phi_j$  o ângulo de fase. A função co-seno é utilizada, geralmente, pois o ângulo de fase pode ser determinado como correspondendo ao tempo onde a função harmônica é maximizada.

O tempo ( $t$ ) pode ser obtido a partir da Equação (3).

$$t = \frac{\phi_j \cdot N}{2\pi} \quad \text{Eq.(3)}$$

Para estimar a amplitude,  $C_j$ , utiliza-se a Equação (4).

$$C_j = \sqrt{A_j^2 + B_j^2} \quad \text{Eq. (4)}$$

onde  $A_j$  é  $B_j$  são as componentes de co-seno e seno, respectivamente, do vetor amplitude ( $C_j$ ), sendo obtidas pelas Equações (5) e (6).

$$A_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{N}\right) \quad \text{Eq.(5)}$$

e

$$B_j = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_i \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot t}{N}\right) \quad \text{Eq.(6)}$$

Já, o ângulo de fase  $\phi_j$  é determinado pela Equação (7):

$$\left\{ \begin{array}{lll} \phi_j = \tan^{-1} \frac{B_j}{A_j} & \text{se} & A_j > 0 \\ \phi_j = \tan^{-1} \frac{B_j}{A_j} \pm \pi \text{ ou } 180^\circ & \text{se} & A_j < 0 \\ \phi_j = \frac{\pi}{2} \text{ ou } 90^\circ & \text{se} & A_j = 0 \end{array} \right. \quad \text{Eq.(7)}$$

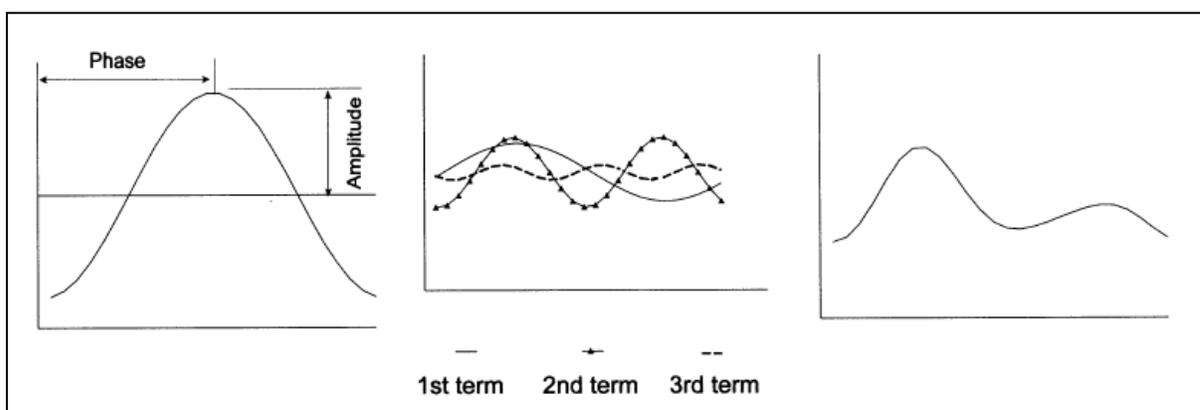
Para calcular a contribuição de cada harmônico ( $j$ ) na variância total da série de dados, utiliza-se a razão entre a amplitude do harmônico e duas vezes a variância populacional ( $S^2$ ), conforme a Equação (8).

$$j = \frac{C_j^2}{2S^2} \quad \text{Eq.(8)}$$

A análise harmônica permite representar uma função complexa como a somatória de ondas (termos) senoidais e cossenoidais, onde cada onda é definida por um valor único de amplitude e de fase (ver Figura 5). A amplitude corresponde à metade do valor onde a função é maximizada e a fase (ou ângulo de fase) é o deslocamento entre a origem e o pico da onda no intervalo de 0 até  $2\pi$  (DAVIS, 1986).

Cada termo designa o número de ciclos completados por uma onda num determinado intervalo. O primeiro harmônico ou harmônico fundamental tem um período T (onda anual) igual ao período total de estudo. O segundo harmônico tem um período igual à metade do

período do primeiro harmônico  $T/2$  (onda semestral). O terceiro harmônico  $T/3$  (onda quadrimestral) e assim sucessivamente.



**Figura 5. Curva de co-seno representando o primeiro harmônico (a); curvas para os primeiros três harmônicos (b); curva resultante da somatória dos três harmônicos (c). FONTE: Modificado de JAKUBAUSKAS et al. (2001).**

Em geral, o número de harmônicos equivale à metade do número de observações. No entanto, os primeiros harmônicos são suficientes, geralmente, para descrever a função periódica. Similar à técnica de componentes principais, cada termo representa uma porcentagem da variância total da série de dados (PANOFSKY & BRIER, 1968). A análise harmônica, da mesma maneira que a análise por componentes principais permite a redução da dimensionalidade das imagens. No entanto, a análise harmônica tem a vantagem que a transformação é feita pixel a pixel e o resultado de um pixel é independente do resto da imagem (JAKUBAUSKAS et al., 2001).

#### **2.3.4 *Análise Harmônica: Identificação de áreas agrícolas***

Os estudos sobre fenologia da vegetação utilizando séries temporais de imagens de sensoriamento remoto têm variado consideravelmente, indo desde a análise por componentes principais e análise textural até a utilização de métricas que descrevem as mudanças sazonais do índice de vegetação de diferença normalizada. JAKUBAUSKAS et al. (2002a) aplicaram a análise harmônica num conjunto de nove anos de imagens NDVI/AVHRR com o intuito de conhecer as mudanças interanuais de uso e cobertura de solo na região de Great Plains, nos Estados Unidos. Os resultados mostraram o potencial da técnica no monitoramento do uso e

cobertura do solo. Ainda com séries de imagens mensais NDVI/AVHRR e análise harmônica, AZZALI & MENENTI (2000) mapearam unidades homogêneas de vegetação-solo-clima no Sul da África e concluíram que existe uma estreita relação entre os valores de amplitude do primeiro e do segundo harmônico com os níveis de aridez que influenciam os tipos de vegetação e a fenologia dos mesmos.

JAKUBAUSKAS et al. (2002b), através da análise dos três primeiros harmônicos de um conjunto de imagens bimensais de NDVI/AVHRR de 1992, conseguiram identificar culturas agrícolas distintas. Os autores utilizaram um mapa de uso e cobertura do solo reamostrado para uma resolução de um quilômetro visando identificar os pixels puros que serviram como referência para a análise. Os resultados mostraram a viabilidade da metodologia adotada, apesar da imprecisão do mapeamento devido à resolução empregada e a discriminação das culturas pelos padrões dos harmônicos. Segundo esses autores, o potencial da análise harmônica como filtro de redução de ruídos deveria ser explorado, uma vez que o ruído introduzido numa série temporal de NDVI por nuvens ou pelo tipo de processamento para formação das imagens não é periódico. Adicionalmente, a análise harmônica tem sido utilizada para reconstruir imagens livres de nuvens de séries de dados NDVI (ROERINK et al., 2000) e SPOT/VEGETATION (WADA & OHIRA, 2004).

### **2.3.5 *Classificação de áreas agrícolas baseadas nos resultados dos termos harmônicos***

A classificação de imagens é o processo de produção de um mapa temático dividido em categorias que são visíveis em uma imagem obtida por meio remoto. Muitos fatores podem causar confusão nas características espectrais dos alvos, incluindo topografia, sombreamento, efeitos atmosféricos, mudanças na calibração de sensores e mistura de classes dentro do campo de visada do sensor. Dentre esses fatores, alguns podem ser tratados e outros não por esta razão SCHOWENGERDT (1997), destaca a importância de considerar a variabilidade estatística entre eles.

A divisão dos padrões dos alvos que se deseja classificar é feita por programas computacionais denominados algoritmos de classificação ou simplesmente classificadores, conforme MOREIRA (2001), e podem ser divididos em três grandes grupos: supervisionada,

não-supervisionada e híbrida. Na classificação supervisionada, é necessária a seleção das amostras conhecidas denominadas “amostras de treinamento”, que representam o comportamento médio das classes que devem ser mapeadas, devendo, portanto, ser amostras bastante homogêneas. Na classificação não-supervisionada tem-se pouco controle sobre a separação das amostras, necessitando, para isso, que as amostras sejam bastante heterogêneas de forma a aumentar a certeza que classes possíveis estarão representadas, processo que despende grande esforço computacional (NOVO,1992).

A diferença entre os classificadores reside no reconhecimento das amostras, por meio dos algoritmos, que, no caso do método supervisionado, envolve parâmetros estatísticos como média, matriz de covariância, entre outros. Na classificação não-supervisionada, os algoritmos baseiam-se apenas na variação dos níveis de cinza das amostras de treinamento conforme afirma MOREIRA (2001). O treinamento para uma classificação adequada implica em um processo de refinamento, para superar omissões de classes espectrais importantes, e inclusões de classes redundantes do ponto de vista computacional. Este refinamento das amostras de treinamento é, geralmente, um ponto importante para melhorar a exatidão de uma classificação. Contudo, uma similaridade elevada entre padrões de resposta espectral de duas categorias não pode ser superada por nenhuma técnica (LILLESAND & KIEFER, 1994).

A técnica análise harmônica vem sendo frequentemente utilizada na busca de padrões que possam auxiliar o mapeamento superfícies vegetais, tanto utilizando o processo supervisionado como o não-supervisionado. Segundo JAKUBAUSKAS et al. (2001), culturas diferentes, tais como milho, soja e alfafa, por exemplo, exibem padrões sazonais distintos do NDVI, sendo as imagens amplitude e fase, produzidas pela aplicação da análise harmônica em imagens AVHRR/NOAA, utilizadas para desenvolver uma metodologia que possibilite a sua identificação. A classificação supervisionada utilizada pelos autores, tendo como base um mapa temático da região, apresentou uma acurácia de 52% na identificação dessas culturas.

MOODY & JOHNSON (2001) aplicaram a análise harmônica numa série mensal de valores de NDVI num período de sete anos para uma área com 150×150km no sul da Califórnia, com o intuito de identificar características fenológicas da vegetação local. Os autores utilizaram imagens termo aditivo, amplitude e fase para produzir um mapa classificado das formações vegetais. Os resultados foram avaliados por comparação com outros produtos

disponíveis (mapas utilizados como referência) e avaliação de campo, e indicaram a eficiência da técnica na identificação das culturas de interesse.

As características e a variação da cobertura vegetal na China também foram estudadas utilizando séries temporais de imagens NDVI do sensor AVHRR/NOAA e análise harmônica. JIANG et al. (2008) utilizaram uma série de imagens com dados de 1981 a 2001, sendo que os componentes termo aditivo, fase e amplitude foram analisados e as relações entre esses componentes e a variação da cobertura vegetal foram investigadas. Os resultados da classificação da distribuição vegetação indicaram que a técnica foi um método eficaz para o tratamento, análise e aplicação em longo prazo de séries de dados de sensoriamento remoto.

GAUTAM et al. (2007) utilizaram uma série temporal de dez anos (1995-2005) de imagens AVHRR/NOAA representadas pela composição anual visando desenvolver uma técnica inovadora para classificação baseada nas variações temporais do NDVI. O algoritmo proposto consistiu de três etapas: (1) Correção das distorções geométricas e calibração os dados radiométricos (2) Detecção de nuvens e água nas imagens e aplicação de análise harmônica para produzir imagens de amplitude, termo aditivo, variância e fase, e (3) Aplicação de imagens amplitude de bandas diferentes para detectar e classificar a região de interesse (cobertura vegetal). Os resultados obtidos indicam que o método proposto classificou a região de interesse com 91% de precisão.

No Brasil, a técnica de análise harmônica também vem sendo utilizada para identificação de áreas agrícolas nas imagens composição mensal do NDVI/AVHRR e do EVI/MODIS. NASCIMENTO et al. (2009) utilizaram a resposta dos termos harmônicos expressos em função de uma composição R (amplitude), G (termo aditivo) e B (fase) para classificar áreas com cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Para identificação das áreas agrícolas de interesse foi aplicado um algoritmo de árvore de decisão com o intuito de separar os pixels com a cultura. Foi obtida uma confiança de 88% e 92% de precisão na classificação dos pixels com e sem a cultura, respectivamente, para a região Nordeste do estado, onde concentra-se a principal região produtora.

PARDI LACRUZ (2006) aplicou a técnica da análise harmônica em séries temporais de imagens EVI do MODIS, na caracterização de paisagens. Os resultados obtidos mostraram o potencial desta técnica para geração de mapas de uso e cobertura do solo dos biomas

Amazônia e Cerrado, utilizando-se composições coloridas falsa-cor das imagens amplitude, fase e termo aditivo.

ARENAS-TOLEDO (2008) caracterizou a dinâmica das culturas de milho, soja e algodão, em quatro municípios do estado do Mato Grosso, através da aplicação da análise harmônica, na série temporal de imagens EVI/MODIS. A classificação supervisionada através do algoritmo de máxima verossimilhança, dos componentes harmônicos, na identificação dessas culturas, alcançou acurácia próxima a 90%, ultrapassando as obtidas quando foram utilizadas exclusivamente as bandas de refletância do MODIS da época de maior desenvolvimento das culturas.

### **2.3.6 Avaliação da qualidade da classificação**

Segundo LILLESAND & KIEFER (1994), uma classificação não está completa até que sua validação seja avaliada. A avaliação da exatidão da classificação das coberturas terrestres derivada de dados de sensoriamento remoto tem sido reconhecida como uma ferramenta valiosa no julgamento da adequabilidade desses dados para varias aplicações, uma vez que determina o valor da informação.

No início da década de 80 surgiram novas técnicas para testar a exatidão dos mapas, tornando-se padrão para registrar a exatidão da classificação de dados de sensoriamento remoto a determinação da matriz de erro. Em adição, o uso da determinação estatística do índice Kappa foi recomendado por muitos pesquisadores como uma medida aceitável da exatidão (STORY & CONGALTON, 1986; COHEN, 1960). Os autores também definem a matriz de erro como a forma mais comum para representar a exatidão da classificação de um mapa por meio da definição da porcentagem da área do mapa corretamente classificada em comparação com dados de referência, também denominado *verdade terrestre* e/ou dados de referência.

Os autores complementam que a partir da matriz de erro é possível também avaliar o desempenho da classificação para cada categoria individual. A verificação dos erros de classificação, ou seja, o sucesso atingido no processo é complementado comparando o mapa temático produzido com um mapa considerado referência. Considera-se que quanto melhor for à qualidade do mapa temático, menor será a diferença entre ele e um mapa “referência”. Essa

diferença representa a medida determinada pelo coeficiente Kappa proposto por COHEN (1960) e estabelece que, quanto maior o valor do índice, melhor será considerado o resultado da classificação. A Tabela 3 descreve a avaliação de qualidade da classificação proposta por LANDIS & KOCH (1977).

**Tabela 3. Qualidade da classificação associada aos valores do Índice Kappa.**

| <i>Índice Kappa</i> | <i>Qualidade</i> |
|---------------------|------------------|
| 0                   | Péssima          |
| 0,01 a 0,20         | Ruim             |
| 0,21 a 0,40         | Razoável         |
| 0,41 a 0,60         | Boa              |
| 0,61 a 0,80         | Muito Boa        |
| 0,81 a 1,00         | Excelente        |

#### **2.4 *Estimativa da produtividade de safras agrícolas***

As estimativas agrícolas são um meio importante para apoiar a agricultura, especialmente no que se refere ao planejamento. Instituições públicas, empresas agrícolas e outras entidades de planejamento necessitam conhecer, as datas de ocorrência dos estádios fenológicos das culturas para estimar, o impacto de condições meteorológicas adversas ao desenvolvimento das mesmas, a fim de adotar medidas corretivas sempre que necessárias. Essas informações são úteis também, para fornecer condições adequadas de colheita, armazenagem, transporte, exportação e importação (PICOLI, 2007).

##### **2.4.1 *Modelos de estimativa da produtividade agrícola***

O levantamento de estatísticas sobre safras agrícolas é um requisito fundamental para que sejam traçadas medidas que venham favorecer o processo produtivo, evitando especulações e favorecendo preços justos (RIZZI & RUDORFF, 2003). No Brasil, as

estimativas oficiais<sup>i</sup> de produtividade agrícola são realizadas, predominantemente, através de entrevistas feitas com os produtores, especulações sobre vendas de insumos, análise de safras passadas, observação das condições meteorológicas, entre outros fatores.

Em função disso, é crescente a demanda por metodologias que permitam a obtenção de tais informações de maneira mais precisa, ou seja, que relacionem a variabilidade meteorológica aos fatores que afetam o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas e definam a sua produtividade. Cada vez mais, vêm sendo, constantemente desenvolvidos modelos de estimativas de produtividade que levam em consideração essas características. Esses modelos podem ser: Matemáticos, Matemáticos-espectrais, Agrometeorológicos ou Agrônômicos-espectrais, na busca de informações mais precisas, que podem ser aplicadas em diferentes culturas. Os modelos matemáticos de estimativa de produtividade visam simular ou estabelecer relações entre as condições de crescimento das culturas e sua produtividade. Diversos trabalhos científicos relatam o desempenho desses modelos aplicando diferentes ênfases temáticas em função do interesse envolvido, tais como: Agrometeorologia, fisiologia vegetal, estatística e economia, entre outras. Ressalta-se que, o modelo se torna mais completo quando os vários aspectos relacionados com a formação da produtividade das culturas são considerados (BRAGA, 1995).

Os modelos agrometeorológicos visam representar de forma simplificada as relações existentes entre a resposta fisiológica das plantas e as variáveis ambientais registradas durante os diferentes estádios fenológicos de uma cultura.

Esses modelos requerem um conhecimento mais detalhado sobre as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, as quais são transferidas para sistemas de equações que procuram quantificar as contribuições das variáveis agrometeorológicas na expressão da produtividade final das culturas agrícolas. Nesses modelos, a decisão sobre quais variáveis devem ser consideradas na análise está baseada em relações empíricas robustas obtidas através do conhecimento experimental que também consideram os processos fisiológicos da

---

<sup>i</sup> Os sistemas de previsão de safras convencionais baseiam-se no produto da área ocupada pelo rendimento médio para obtenção da produção final das culturas. Os valores de cada uma dessas variáveis podem ser obtidos por meio de censos agropecuários (método utilizado pelo IBGE) ou pela amostragem pré-estabelecida da população agrícola (método utilizado pela CONAB). O levantamento censitário tem como objetivo fornecer uma classificação detalhada da estrutura agrícola de um país, onde o valor de cada variável para a área total do levantamento é obtido a partir dos valores das variáveis em todas as unidades. No levantamento amostral, o valor de cada variável para a área total do levantamento é obtido a partir de inferências feitas sobre uma amostra da população (FAO, 1996).

vegetação. Os modelos agrometeorológicos explicam não só o fenômeno estudado, mas também, permitem extrapolações para condições ambientais diferentes daquelas vigentes sobre os dados utilizados para a geração dos modelos (KING, 1989).

Nas últimas décadas, com o advento dos satélites de observação da Terra, atenção considerável foi dada ao desenvolvimento de modelos de produtividade que utilizem dados coletados por sensores remotos. Muitos esforços foram concentrados no estabelecimento de relações empíricas entre parâmetros agronômicos (tais como o índice de área foliar e biomassa) e variáveis espectrais (tal como: índices de vegetação) para serem utilizados em modelos de estimativa de produtividade (RUDORFF, 1985; RUDORFF & BATISTA, 1990; RUDORFF e BATISTA, 1991; BERKA et al., 2003; RIZZI, 2004).

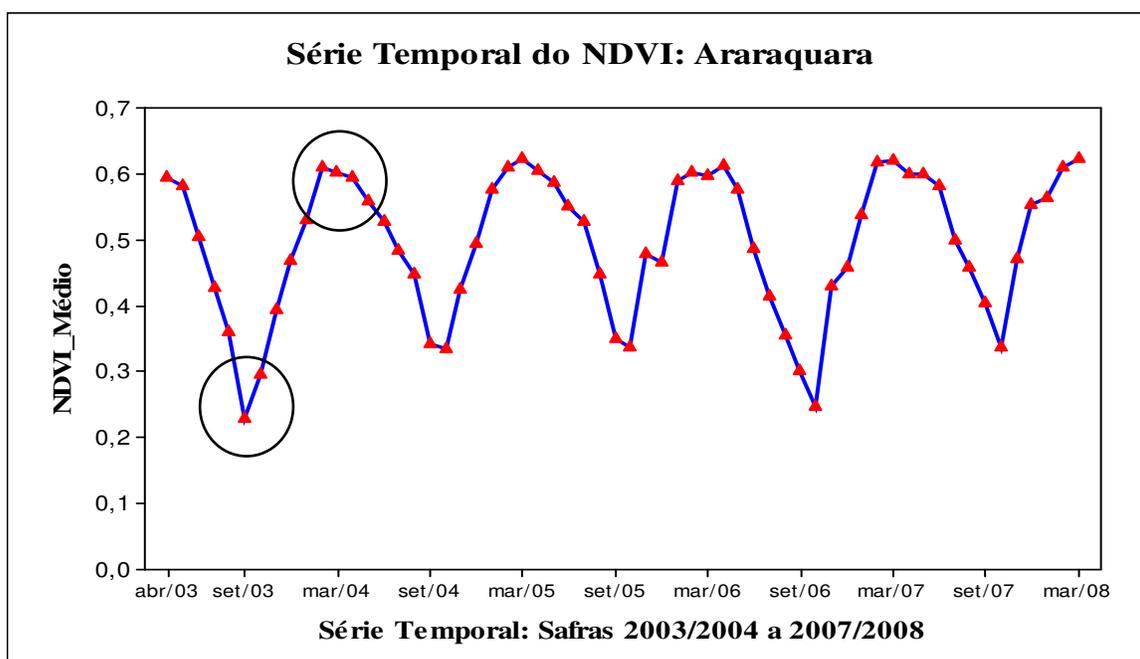
#### **2.4.2 *Modelo Matemático: Modelo Fenológico-espectral***

PELLEGRINO (2001) desenvolveu um modelo matemático, chamado no trabalho de fenológico-espectral, baseado em informação espectral com o objetivo de estimar a produtividade final da cana-de-açúcar a partir dos dados espectrais do satélite AVHRR/NOAA, expresso pelo NDVI. O modelo foi desenvolvido na fazenda São Bento Velho, de propriedade da Usina São Martinho no município de Guariba, interior de São Paulo, totalizando uma área de 694,41ha. As características principais da área são: solo do tipo latossolo roxo e latossolo vermelho Escuro, variedade cultivada RB83-5486, com ciclo de aproximadamente doze meses, plantio utilizando espaçamento de um metro entre linhas, colheita mecanizada e localizada na fazenda. O autor afirma que o passo inicial a ser dado, na direção da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no acompanhamento ou monitoramento da evolução da cultura e posterior estimativa da produção final, é buscar uma compreensão do ciclo produtivo, que pode ser obtido através de estimativas da produção de massa verde ou seca de uma comunidade vegetal, ou seja, de sua fitomassa e, ainda, de seu índice de área foliar.

Aplicando os valores do NDVI, obtido das imagens AVHRR/NOAA-14, buscou-se ajustar equações de regressão que permitissem estimar a Massa Seca dos Colmos (**MSC**) e, posteriormente, a Massa Seca dos Colmos Proporcional (**MSCProp**), na determinação do parâmetro-chave que é a Produtividade Final. A hipótese foi que dados orbitais analisados,

após as correções geométricas e atmosféricas necessárias, tivessem comportamento parecido aos dados de campo. A produção final da cana-de-açúcar foi obtida através de modelos estatísticos de correlação baseados em dados de produção instantânea medida num determinado número de dias após o corte (**D**).

A Figura 6 exemplifica o parâmetro e/ou termo “D” para o município de Araraquara, ao longo das safras 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 e 07/08 estudadas no trabalho. O termo “D” deve ser entendido como o intervalo de dias entre os pontos de mínimo e máximo desenvolvimento da cultura, expresso a partir do perfil temporal do NDVI.



**Figura 6. Representação do termo “D” para o município de Araraquara, ao longo das safras 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 e 07/08. Os meses de março/abril e setembro/outubro representam, respectivamente, os pontos de máximo e mínimo crescimento vegetativo da cultura.**

Na prática a variável (D) funciona como fator de ponderação do NDVI e representa os dados meteorológicos transformados em Graus-Dia ou a relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial, mais comumente utilizada em trabalhos de estimativa de Produção. Os períodos de setembro e março representaram, respectivamente, os pontos de mínimo e máximo crescimento vegetativo da cultura, sendo o termo MSC estimado ao longo desse intervalo de dias. A base do modelo proposto por PELLEGRINO (2001) é apresentado na Equação (9).

$$MSC = NDVI * (-325,394) + D * 17,1384 + (-963,69) \quad \text{Eq.(9)}$$

As variáveis numéricas representam os coeficientes de ajuste do modelo com  $R^2 = 0,9567$ . A partir da Equação 10, é determinada a estimativa da MSCProp com base no modelo de crescimento, apresentado na Equação (9).

$$MSCProp = 1,309664 * 10^{(-16)} * D (11,33342 - 1,995582 * \log(D)) \quad \text{Eq.(10)}$$

Onde, a MSCProp apresenta um coeficiente de ajuste com  $R^2=0,9866$ . Essa equação ressalta o comportamento da cultura ao longo do ciclo de crescimento e procura minimizar a expressão da condição meteorológica, que seria a responsável principal pelas diferenças na produção final entre os ciclos (safras), em função do termo “D”. A última etapa é o cálculo da Massa Seca Máxima do Ciclo (**MSCMax**), que determinará a estimativa final da produtividade no ano-safra, Equação (11), sendo o valor obtido correlacionado como as estimativas oficiais de produtividade, realizadas pelo IBGE.

$$MSCMax = \frac{MSC}{MSCprop} \quad \text{Eq.(11)}$$

A partir da avaliação do perfil temporal do NDVI dos municípios selecionados, foi definida a variação do parâmetro “D” entre 70 e 365 dias, ou seja, entre os meses de julho e março. Este período está diretamente relacionado com a diminuição e o aumento dos valores do NDVI, representando respectivamente o período de colheita (diminuição dos valores do NDVI) e o crescimento vegetativo da cultura, onde são encontrados os picos dos valores do NDVI ao longo da série temporal de imagens. O principal objetivo dessa análise é avaliar a viabilidade da utilização do modelo, em aplicação de real interesse prático. Inicialmente proposto em uma escala de trabalho menor, o modelo foi ajustado para uma escala municipal.

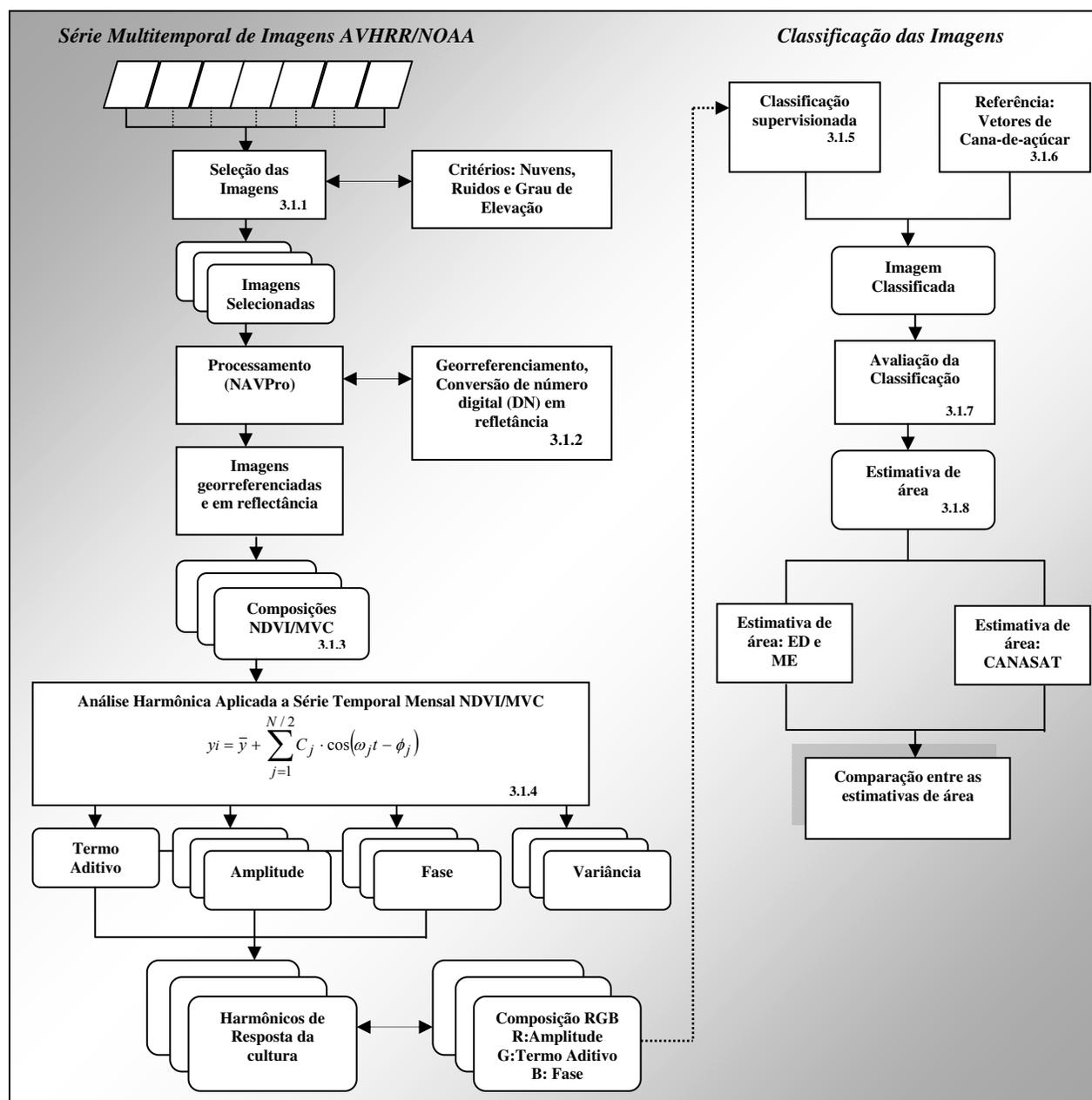
### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O material e os métodos do trabalho, apresentados a seguir, foram divididos em duas partes:

- 3.1** *Primeira Etapa*: Identificação das áreas com cana-de-açúcar através da exploração de séries temporais de imagens AVHRR/NOAA
- 3.2** *Segunda Etapa*: Avaliação da correlação entre NDVI, Dias após o corte (D) e produtividade.

### 3.1. Primeira Etapa: Identificação das áreas com cana-de-açúcar através da exploração de séries temporais de imagens AVHRR/NOAA

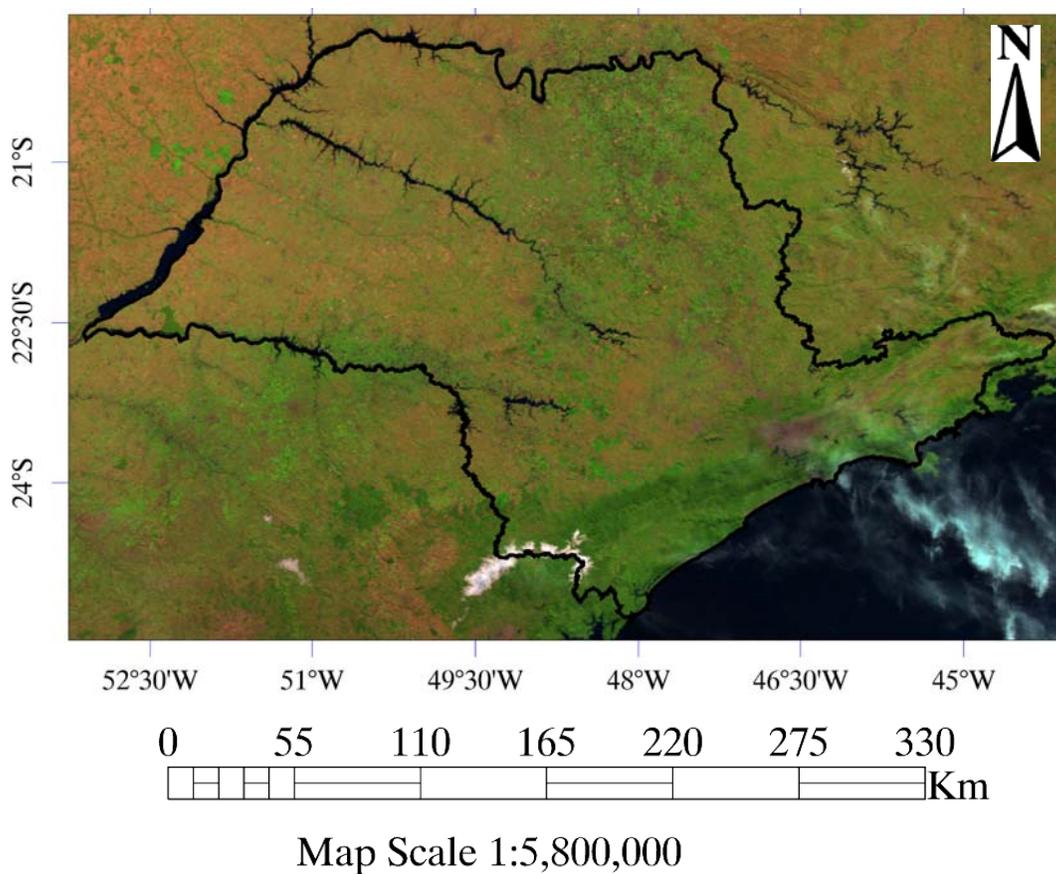
A Figura 7 contém o fluxograma da metodologia empregada nesta etapa do trabalho. Os itens no canto inferior referem-se à seção desse capítulo que contém a descrição detalhada da atividade correspondente.



**Figura 7. Fluxograma da metodologia utilizada na identificação dos pixels com cana-de-açúcar baseado na série temporal de imagens NDVI/AVHRR no estado de São Paulo.**

### 3.1.1 Seleção das imagens: Área de estudo

Foram utilizadas séries temporais de imagens do sensor AVHRR/NOAA, de cinco anos-safra (período que vai de abril de um ano a março do ano seguinte), correspondentes as safras 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 e 07/08 o todo o estado de São Paulo. As imagens foram obtidas diretamente do banco de imagens do satélite NOAA, disponíveis no Cepagri, e apresentam, as seguintes coordenadas geográficas como limites:  $19^{\circ}37'45,12''S$  e  $25^{\circ}27'0,72''S$  e  $44^{\circ}1'47,17''W$  e  $53^{\circ}15'3,34''W$  (Figura 8).



**Figura 8. Composição RGB – 321 – NOAA-17 do dia 27/05/2006, 13:04:45 (GMT), mostrando os limites geográficos da área de estudo.**

### **3.1.2 Georreferenciamento das imagens AVHRR/NOAA e Geração das imagens NDVI no Programa NAVPro (Navigation Products)**

Embora designadas para fins meteorológicos e oceanográficos, que normalmente não requerem precisão geométrica alta, as imagens do AVHRR têm sido utilizadas para estudos da superfície da terra, que normalmente requerem um georreferenciamento preciso. Entretanto, nem sempre tem-se dado atenção à questão geométrica das imagens, fator preponderante quando se pretende explorar a alta resolução temporal do sensor. Nesse sentido, ESQUERDO et al.(2006), em parceria com a Universidade do Colorado (*Colorado Center for Astrodynamics Research - CCAR*) adaptaram um sistema automático para o georreferenciamento preciso dessas imagens e posterior geração de produtos.

O sistema denominado NAVPro é composto por uma série de programas executados via linha de comando no IDL necessitando de um conjunto de imagens (série temporal de imagens) para geração dos produtos finais. O processamento das imagens do AVHRR no NAVPro inclui as seguintes etapas. Em seguida, a sequência detalhada de cada etapa.

- a) Conversão do formato HRPT “raw data” para o formato CCAR, bastante similar ao Level 1B;
- b) Transformação dos níveis de cinza das imagens dos canais 1 e 2, que representam, respectivamente, as regiões espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, para valores de refletância no topo da atmosfera;
- c) Demarcação e/ou identificação de nuvens;
- d) Geração de imagens NDVI;
- e) Geração das composições de máximo valor ou MVC do índice de vegetação NDVI.

Para executar as etapas do processamento das imagens AVHRR/NOAA acima relacionadas, foi utilizado uma sequência de comandos principal denominado *geo*, composto por comandos que acionam os módulos para a conversão do formato bruto, calibração radiométrica, correção geométrica e geração de produtos.

Primeiramente, fez-se a conversão do formato bruto das imagens AVHRR/NOAA Telonics T-RIS (HRPT), de 2003 a 2004, e L1B, a partir de 2005, para um formato genérico, denominado CCAR, compatível com os passos subsequentes do sistema. A calibração

radiométrica foi feita após a conversão do formato bruto. Ela é responsável por converter o valor digital (nível de cinza) em refletância aparente (no topo da atmosfera) para os canais 1, 2 e 3A. Utilizaram-se valores atualizados dos coeficientes de calibração obtidos automaticamente pelo NAVPro com base nos dias após o lançamento do NOAA-17.

Após a calibração radiométrica, fez-se a correção geométrica, que gerou imagens georreferenciadas com precisão de um pixel (1,1km) na projeção cartográfica Cilíndrica Equidistante. Este processo é baseado na metodologia proposta por ROSBOROUGH et al. (1994), que utiliza os métodos de navegação indireta e faz a correção dos deslocamentos a partir da estimativa dos erros de altitude do satélite. A navegação indireta é o processo que relaciona cada pixel da imagem ao seu correspondente valor digital medido pelo sensor. Deste processamento resultaram cinco imagens individuais navegadas de cada banda e outras duas referentes ao ângulo zenital solar e ao ângulo de elevação do satélite para cada pixel da imagem, contendo apenas o estado de São Paulo.

O método faz o uso de pontos de controle coletados automaticamente por meio da técnica da Máxima Correlação Cruzada (MCC), que compara a imagem-alvo a uma imagem-base, geometricamente precisa e sem nuvens, utilizando uma janela de busca entre as duas imagens, detectando feições termais comuns entre ambas. Uma vez encontrada uma feição semelhante entre as duas imagens, são calculados os vetores de deslocamento desta feição, que dá origem aos pontos de controle. São utilizadas imagens dos canais termais porque as feições de temperatura são mais estáveis ao longo do tempo.

O algoritmo aplica um filtro de nuvens para assegurar que todos os pixels da imagem utilizados pela MCC não sejam contaminados com nuvens nas imagens-base e alvo. Nesse processo, também é utilizada uma máscara terra (valor 1)/água (valor 0) para que a busca por feições seja realizada apenas sobre a superfície terrestre. Assim, a MCC determina os erros de altitude e refaz a navegação indireta, gerando imagens com erro de georreferenciamento dentro de um pixel.

A imagem base deve apresentar precisão geométrica elevada, pois ela é utilizada como referência na coleta automática de pontos de controle para o georreferenciamento de uma imagem de entrada. Para que seja uma imagem-base, ela tem que apresentar presença mínima de nuvens, serem próxima ao nadir e estar temporalmente próxima à imagem-alvo, isto é, ser pelo menos da mesma estação do ano da imagem-alvo, por se tratar de imagens com

gradientes de temperatura diferentes. Como resultados deste processo, obtêm-se imagens calibradas e corrigidas geometricamente do estado de São Paulo. Com essas imagens, geraram-se os produtos, representando a etapa final do processamento das imagens. Dos vários produtos gerados pelo NAVPro, o NDVI foi o único utilizado neste trabalho e foi a base para os estudos da análise harmônica e o modelo fenológico-espectral, aplicados a série temporal das imagens AVHRR/NOAA-17, nos diferentes anos-safra estudados.

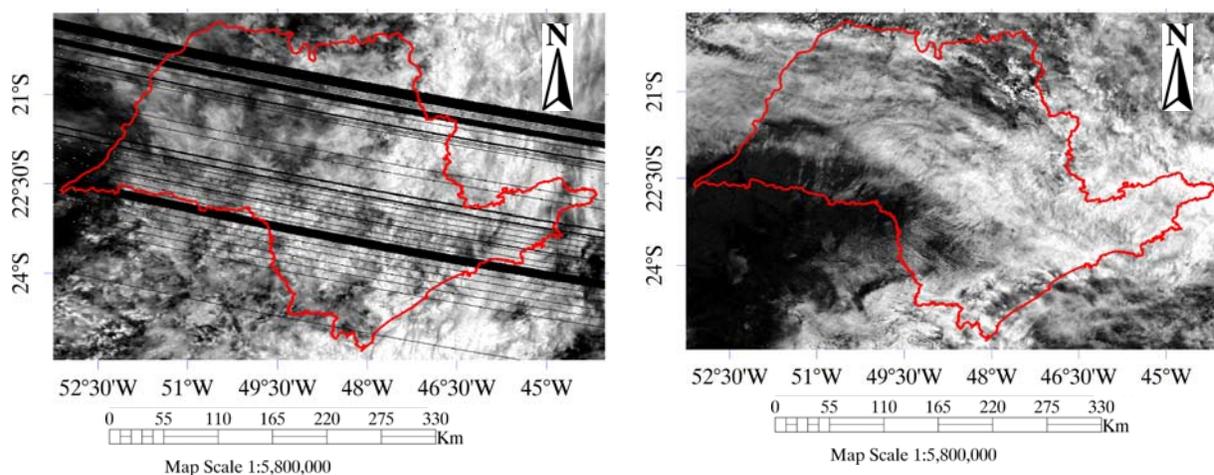
### **3.1.3 Geração das composições mensais (MVC) do índice de vegetação NDVI**

Composições de máximo valor (MVC) são largamente utilizadas a fim de minimizar a influência de nuvens e dos efeitos atmosféricos. Esse método vem sendo largamente aplicado em dados de NDVI, onde o valor máximo de um pixel numa série temporal de imagens é utilizado para a construção de uma composição máxima de um período. As composições de máximo valor, no intervalo mensal, foram geradas automaticamente por meio de uma rotina em IDL, chamada *mvncdvimes*. Neste tipo de composição, os efeitos atmosféricos, como o espalhamento e a absorção são minimizados.

O processamento automático, utilizado exclui imagens com mais de 30% de cobertura de nuvens em razão do sombreamento dos pixels, que provoca uma modificação do valor do NDVI. Ressalta-se que, esse parâmetro tem sido utilizado com sucesso na estimativa da produtividade em diversas culturas (TAYLOR et al, 1998; Qi et al.,1994). Foram descartadas, também, imagens com ruídos de aquisição e as obtidas em passagens com ângulo zenital solar maior que 70° e ângulos de varredura maiores que 42°, em relação à estação de recepção, recebendo valores iguais a -1,1, devido à dificuldade na realização da correção geométrica. A Figura 9 apresenta exemplos de imagens excluídas após o processamento, devido, principalmente, à presença de nuvens, ângulos de inclinação elevados e ruídos na aquisição.

Na primeira etapa do trabalho foram estudadas as composições MVC/NDVI para todo estado. Na segunda etapa, o foco foi extrair apenas os valores do NDVI de cada composição, para os municípios selecionados, a fim de obter o perfil temporal e o seu comportamento ao longo dos anos-safra analisados.

Para extrair apenas esses valores, foi necessário um conjunto de coordenadas (Latitude/Longitude) das áreas de cana-de-açúcar para cada município, tomando-se como referência o mapeamento dessas regiões, que será discutido no item 3.6. Este tipo de análise é necessário, pois evita mistura espectral dos pixels, que é comum, devido à resolução espacial das imagens. Foram feitas cinco séries temporais de imagens, uma para cada ano-safra (de abril a março). Como resultado, foi gerado uma planilha e um gráfico com todos os valores de NDVI dos pixels analisados para cada município em cada ano-safra.



**Figura 9. Exemplos de imagens excluídas no processo de geração das composições de máximo valor do NDVI/MVC.**

Vale ressaltar que para geração das composições mensais MVC do índice de vegetação NDVI, a rotina IDL foi baseada em três informações de entrada:

- 1- Série multi-temporal de imagens NDVI (AVHRR/NOAA), representada pelos meses de abril/2004 a março/2005, tomando-se como exemplo a safra 2004/2005.
- 2- Coordenadas geográficas da área de interesse obtidas via imagens MODIS, as imagens MODIS com resolução de 250m foram utilizadas como imagens referência na correção geométrica das imagens AVHRR/NOAA.
- 3- Limites municipais, fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Como saída, teve-se, além das composições de máximo valor do NDVI em períodos decendiais, quinzenais e mensais, imagens em formatos TIFF e JPG.

### ***3.1.4 Análise Harmônica e Identificação dos pixels com potencial de pertencerem à classe cana-de-açúcar***

Os algoritmos para aplicação da análise harmônica na série temporal de imagens NDVI/AVHRR foram implementados também em linguagem *IDL*, segundo metodologia proposta por PARDI LACRUZ (2006). O algoritmo original foi desenvolvido para imagens do sensor MODIS/TERRA, que apresenta resoluções radiométricas e espaciais diferentes do sensor AVHRR/NOAA. Além dessas características, o MODIS apresenta um índice de vegetação específico denominado EVI com intervalo de valores variando de 0 a 10.000, diferentes dos apresentados pelo NDVI.

Para aplicar o mesmo algoritmo da análise harmônica na série temporal de imagens do AVHRR/NOAA, foi necessário converter a resolução radiométrica de 16 para 10 bits e alterar o índice de vegetação EVI para NDVI<sup>ii</sup>, com escala -1 a 1.

O intervalo dos valores do NDVI foram re-escalados para uma escala de 0 a 200, segundo metodologia proposta por JAKUBAUSKAS (2001). Valores menores que 100 representam tipicamente, água, gelo, neve e superfícies não-vegetais. Valores entre 100 e 200 representam áreas com vegetação.

Os dados de entrada, no algoritmo de análise harmônica, foram meta-arquivos criados no ENVI contendo imagens NDVI/MVC, para cada ano-safra. Como resultado desse processamento, foram obtidas imagens termo aditivo, amplitude, fase e variância para um número de  $N$  harmônicos, distintos para cada ano-safra.

A aplicação do algoritmo da análise harmônica na série temporal de imagens AVHRR/NOAA-17 resultou na geração das imagens termo aditivo, amplitude, fase e variância. As imagens termo aditivo representam a média do NDVI ao longo da série temporal de imagens. As imagens amplitude indicam as variações mínimas e máximas do NDVI ao longo do tempo. Já as imagens variância estão diretamente relacionadas à porcentagem de informação contida em cada harmônico. Por fim, as imagens fase indicam o tempo ao longo da série em que ocorrem os mínimos e máximos valores da amplitude.

---

<sup>ii</sup> A alteração do algoritmo foi realizada pelo Dr. Manoel Araújo Sousa Júnior (INPE) que desenvolveu o algoritmo de análise harmônica para os dados do MODIS.

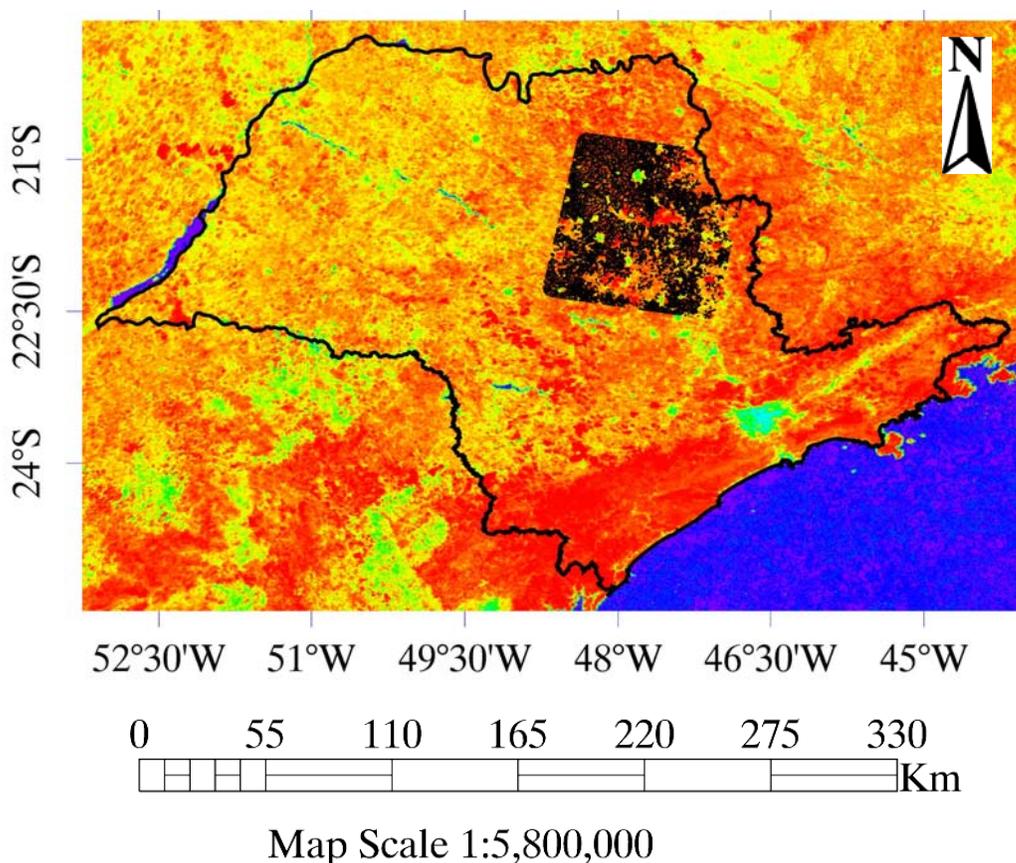
### ***3.1.5 Classificação supervisionada das composições RGB derivadas dos termos harmônicos***

A partir dos harmônicos de resposta da cana-de-açúcar, para cada ano-safra, foi realizada a classificação supervisionada das áreas com a cultura no estado, tomando-se o mapeamento para a cena 220/75 das imagens LANDSAT como pontos de controle, considerando-se as distintas safras utilizadas. A classificação supervisionada, utilizando o algoritmo de Máxima Verossimilhança (MAXVER), foi realizada nas imagens composição colorida RGB, representando respectivamente as imagens amplitude - Canal (R), as imagens termo aditivo - Canal (B) e as imagens fase - Canal (G). Essa forma de composição permitiu discriminar alvos com respostas espectrais similares, em especial, áreas agrícolas de interesse, baseado na metodologia proposta por PARDI LACRUZ (2006). Cada imagem correspondente ao termo harmônico considerado foi re-escalada para uma escala variando de 0 a 1, para que a amplitude dos valores não influenciasse o resultado final da classificação.

O Classificador MAXVER é a técnica de classificação supervisionada mais utilizada para tratamento de dados de satélites. Este método é baseado no princípio que a classificação errada de um pixel particular não tem mais significado do que a classificação incorreta de qualquer outro pixel na imagem (RICHARDS, 1993). A eficácia do MAXVER depende, principalmente, de uma precisão razoável da estimativa do vetor médio e da matriz de covariância de toda classe espectral. Isso depende da quantidade de pixels incluídos nas amostras de treinamento. O resultado do MAXVER é tanto melhor quanto maior for o número de pixels numa amostra de treinamento para implementá-los na matriz de covariância (PREVIDELLI, 2004). Cada classe é determinada por um modelo de classes gaussiano e multivariado, capaz de descrever a distribuição das classes no espaço de atributos. Este modelo leva em conta as extensões de dados em direções espectrais determinadas. No espaço RGB, elipsóides concêntricos de equiprobabilidade, cuja localização, forma e tamanho refletem a média, a variância e a covariância da classe, determinam a probabilidade do pixel pertencer às classes em questão (Cana e Não-cana).

### 3.1.6 Referência e/ou Pontos de controle: Vetores de cana-de-açúcar

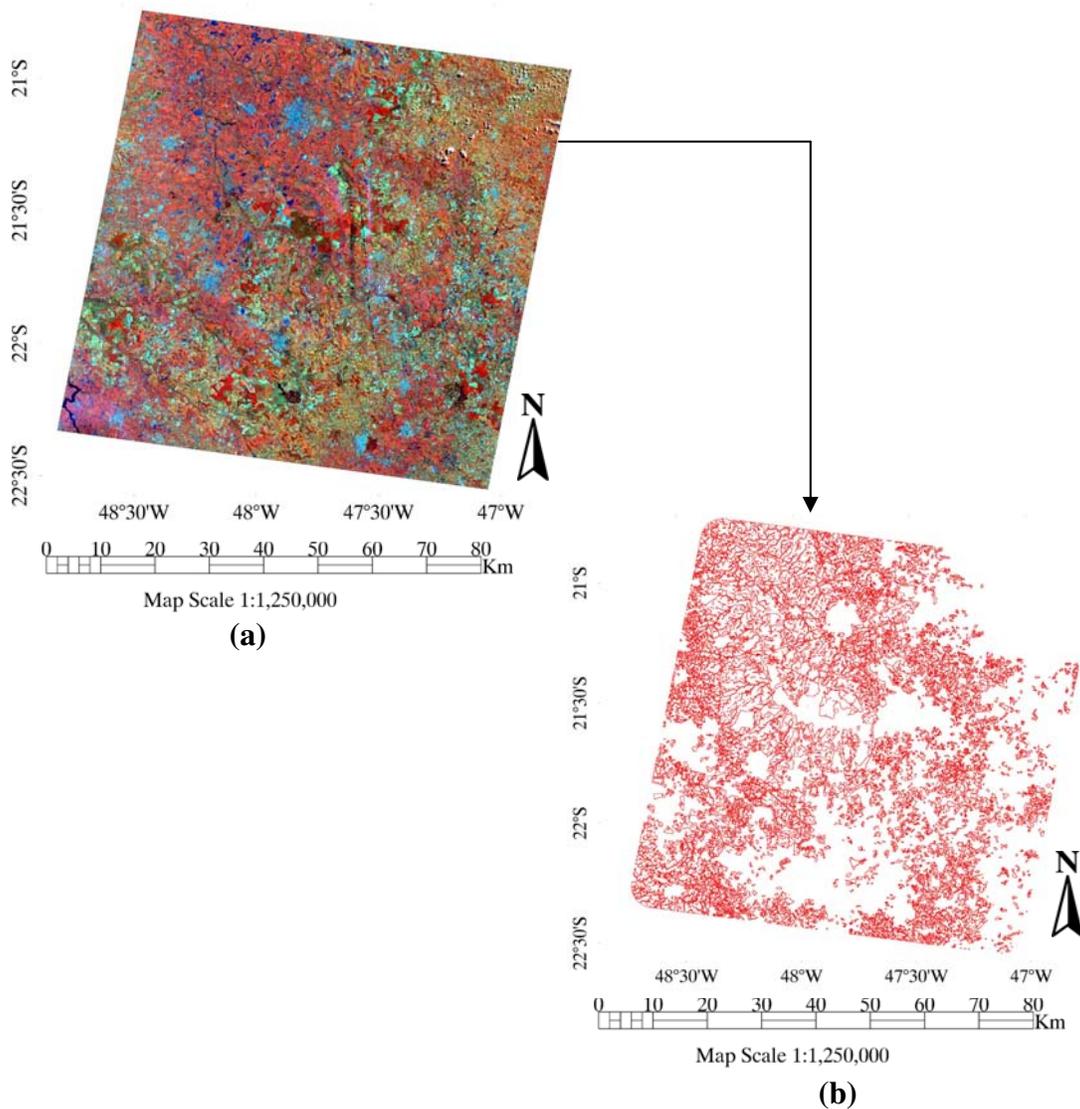
Para evitar misturas entre duas ou mais coberturas vegetais, que são comuns nos pixels do AVHRR/NOAA devido à resolução espacial de 1,1km, foram utilizados, como referência terrestre na identificação das áreas com cana-de-açúcar, os cinco mapeamentos realizados pelo projeto CANASAT/INPE nas diferentes safras estudadas. A Figura 10 apresenta a cobertura espacial da cena 220/75 LANDSAT-7, sensor ETM+, utilizada na geração dos vetores de cana-de-açúcar, tomados como referência.



**Figura 10.** Área de estudo, com destaque para a cobertura espacial da cena 220/75 LANDSAT-7, sensor ETM+, utilizada para geração dos vetores de cana-de-açúcar na safra 2002/2003.

Para cada mapeamento, foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT-7, sensor ETM+, para a cena 220/75, onde concentra-se a principal região produtora do estado (Figura

11.a). Em seguida foi feito um mapeamento, a partir dos vetores (Figura 11.b) com valores entre 0 e 1, onde 1 representa pixels com maior concentração de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, menor mistura espectral (ANTUNES, 2005).



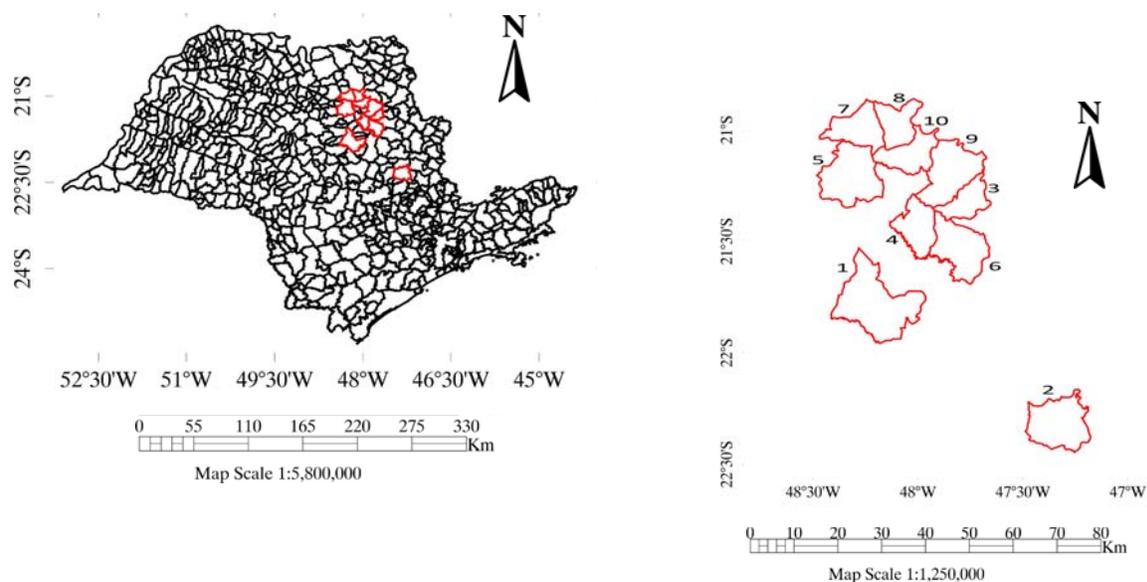
**Figura 11. Composição colorida falsa cor RGB-453 da cena 220/75, LANDSAT-7, sensor ETM+, do dia 03/10/2002 (a) e mapeamento das áreas com cana-de-açúcar (b), obtido pelo projeto CANASAT/INPE para a safra 05/06 (b).**

Foram, extraídas as coordenadas dos pixels com valores (1/cana) correspondentes às áreas com a cultura, sendo estas coordenadas exportadas para um arquivo ASCII. O arquivo resultante fez parte do conjunto de dados, que juntos com os arquivos *shapfile* de contorno dos

municípios delimitaram a extensão de ocupação e crescimento das áreas de cana-de-açúcar nas safras analisadas.

### 3.1.7 Exatidão da classificação gerada a partir da análise harmônica

A avaliação da classificação foi realizada a partir do índice Kappa. O Índice Kappa envolve a matriz de erros completa, incorporando os elementos das linhas e colunas marginais referentes aos erros de classificação no mapeamento das áreas de cana-de-açúcar. Foram escolhidos dez municípios (Figura 12) para avaliar o resultado obtido com a classificação, são eles: Araraquara, Araras, Cravinhos, Guatapar, Jaboticabal, Luís Antônio, Pitangueiras, Pontal, Ribeirão Preto e Sertãozinho.

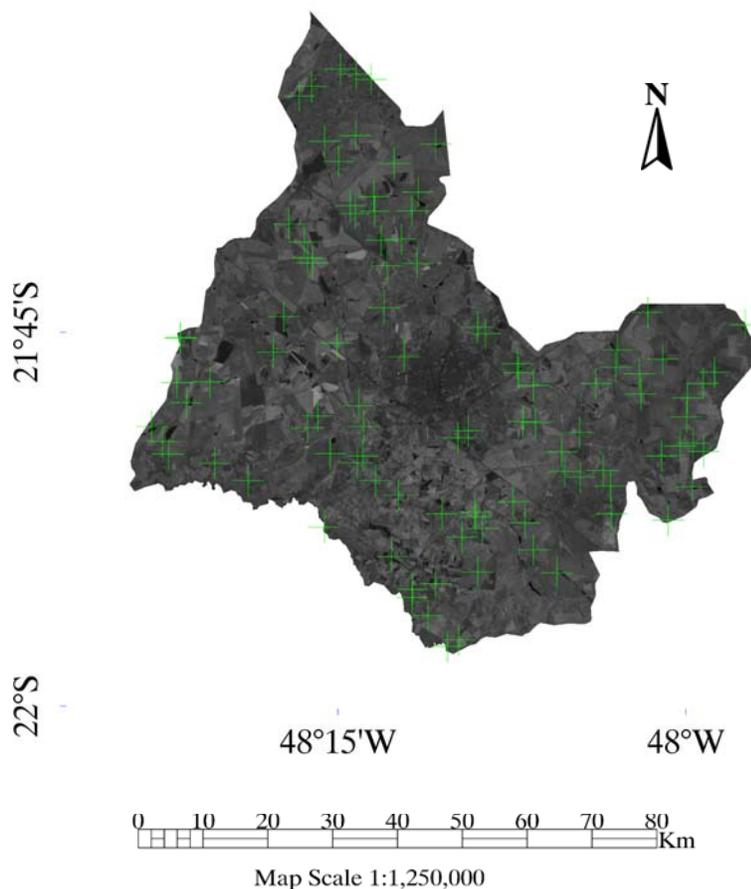


**Figura 12. Distribuio espacial dos municípios selecionados para avaliao do modelo fenológico-espectral utilizado. Em ordem numérica: Araraquara (1), Araras (2), Cravinhos (3), Guatapar (4), Jaboticabal (5), Pitangueiras (6), Luís Antônio (7), Pontal (8), Ribeirão Preto (9), Sertãozinho (10).**

Os municípios selecionados estão situados na região nordeste do estado de São Paulo, considerada a principal região produtora de cana-de-açúcar. O critério utilizado para seleo foi a produo elevada, ao longo das safras avaliadas, cujos dados foram obtidos no serviço SIDRA do IBGE.

### 3.1.8 Cálculo das áreas com cana-de-açúcar nos municípios estudados

O cálculo da área de cana-de-açúcar, dos dez municípios selecionados foi realizada de duas maneiras: a partir da matriz de erro e através da expansão direta. Para cada mapeamento correspondente aos cinco anos-safra analisados, foram selecionados 100 pontos amostrais fixos por município. A Figura 13 apresenta a seleção dos pontos amostrais tomando-se como exemplo o município Araraquara.



**Figura 13. Pontos amostrais, selecionados para a determinação da área com cana-de-açúcar, para o município Araraquara.**

A seleção dos pontos foi realizada por meio de amostragem aleatória simples que consistiu na seleção de uma amostra do total populacional de tal forma que qualquer possível amostra tivesse uma mesma probabilidade de ser escolhida (ANTUNES, 2005). Com a distribuição aleatória dos pontos amostrais sobre as imagens dentro dos limites dos municípios e o posterior levantamento dos pixels com cana-de-açúcar, foi definido o painel amostral

(LUIZ, 2003). A partir desse painel foi determinada a área com a cultura através das duas metodologias acima relacionadas e descritas nos itens abaixo.

### 3.1.8.1 Estimativa da área de cana-de-açúcar de referência por meio da matriz de erro

A Tabela 4 apresenta uma matriz de erros para as classes Cana e Não Cana, no padrão definido por RICHARDS & JIA (1999), com as colunas contendo dados de referência e linhas representadas pela classificação da imagem, construída para a correção da estimativa de área com a cultura nos municípios selecionados.

**Tabela 4. Matriz de erros para a classe Cana e Não Cana.**

|                     |  | <i>Pontos de Referência (j)</i> |                 |              |
|---------------------|--|---------------------------------|-----------------|--------------|
| <i>Máscara (i)</i>  |  | <i>Cana</i>                     | <i>Não Cana</i> | <i>Total</i> |
| <i>Cana (1)</i>     |  | $N_{11}$                        | $N_{12}$        | $N_1$        |
| <i>Não Cana (2)</i> |  | $N_{21}$                        | $N_{22}$        | $N_2$        |
| <i>Total</i>        |  |                                 |                 | 100          |

Onde:

$N_{ij}$  = número de observações da classe de referência  $j$  ocorrendo na classe espectral  $i$ , na amostra;

$N_i$  = número total de observações que ocorrem na classe espectral  $i$ , na amostra.

Para o cálculo da estimativa das áreas com a cultura nos municípios selecionados, foi adotado o método proposto por JUPP (1989), que normaliza a matriz de erros apresentada na Tabela 4. Este método foi aplicado com sucesso em estimativas de área da cultura com soja no estado do Paraná baseado em classificação de imagens utilizando Lógica *Fuzzy* (ANTUNES, 2005). A probabilidade de um pixel que foi previamente atribuído a uma dada classe na realidade pertencer a todas as classes examinadas pode ser estimada pela padronização das linhas e do total de pixels determinadas pela imagem de satélite. Dessa forma, o método é direto e considerado mais natural para corrigir as probabilidades de designação das classes. A matriz de proporção adotada para definir as classes é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5. Matriz de proporções para as classes Cana e Não Cana.**

| <i>Pontos de Referência (j)</i> |                             |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>Máscara (i)</i>              | <i>Cana</i>                 | <i>Não Cana</i>             |
| <i>Cana (1)</i>                 | $p(r_1   c_1) = n_{11}/N_1$ | $p(r_2   c_1) = n_{12}/N_1$ |
| <i>Não Cana (2)</i>             | $p(r_1   c_2) = n_{21}/N_2$ | $p(r_2   c_2) = n_{22}/N_2$ |

Essa matriz está diretamente relacionada com a Equação (12), ou seja, a matriz de proporção é gerada pela divisão dos elementos das linhas por  $N_i$ .

$$p(r_j | c_i) = n_{ij}/N_i \quad \text{Eq.(12)}$$

Onde:

$p(r_j | c_i)$  = proporção da classe de referência  $j$  representada na classe espectral  $i$ , na amostra.

Se o número total de pixels da classe espectral  $i$  na máscara de Cana é  $T_i$ , por município, então a área estimada corrigida da classe de referência  $j$  em pixels é calculada pela Equação (13):

$$A_j = \sum_{i=1}^c p(r_j | c_i) * T_i \quad \text{Eq.(13)}$$

$$A_1 = p(r_1 | c_1) * T_1 + p(r_1 | c_2) * T_2 \quad \text{Eq.(14)}$$

Onde:

$c$  = número total de classes.

$T_1$  = total de pixels da classe Cana na máscara gerada das composições RGB, por município;

$T_2$  = total de pixels da classe Não Cana na máscara gerada das composições RGB, por município.

Portanto, as áreas estimadas corrigidas das classes Cana e Não Cana são calculadas pelas Equações (15) e (16), respectivamente.

$$A_1 = p(r_1 | c_1) * T_1 + p(r_1 | c_2) * T_2 \quad \text{Eq.(15)}$$

$$A_2 = p(r_2 | c_1) * T_1 + p(r_2 | c_2) * T_2 \quad \text{Eq.(16)}$$

### 3.1.8.2 Estimativa da área de cana-de-açúcar de referência por expansão direta

De acordo com LUIZ (2003), o estimador por expansão direta é aquele que, baseando-se apenas nos dados amostrais, reproduz para toda a população as proporções relativas encontradas nas amostras. Este método de estimativa de área plantada com uma cultura num determinado município combina os princípios estatísticos da teoria da amostragem com as características inerentes aos dados de sensoriamento remoto.

EPIPHANIO et al. (2002) afirmam que a estimativa por expansão direta utiliza os dados coletados nas imagens e em levantamento de campo a partir do painel amostral, a respeito das diferentes coberturas vegetais para os pontos amostrais de referência terrestre, permitindo rápida avaliação da área de uma certa classe de uso do solo. A proporção com que uma classe ocorre na amostra passa a equivaler à proporção de área amostral ocupada por essa classe. Então, pressupõe-se que a mesma proporção dos pontos da classe encontrada no painel amostral irá se reproduzir na área total do município, numa expansão direta. De forma resumida, a estimativa por expansão direta também utilizando a máscara de cana-de-açúcar consiste na multiplicação da proporção de pontos identificados como cana a partir da referência terrestre pela área municipal, e é calculada pela Equação (17):

$$A_{Cana} = \frac{P_{Cana}}{P_{Amostra}} * A_{munc} \quad \text{Eq.(17)}$$

Onde,

$A_{Cana}$  = área estimada da cultura de cana-de-açúcar no município (ha);

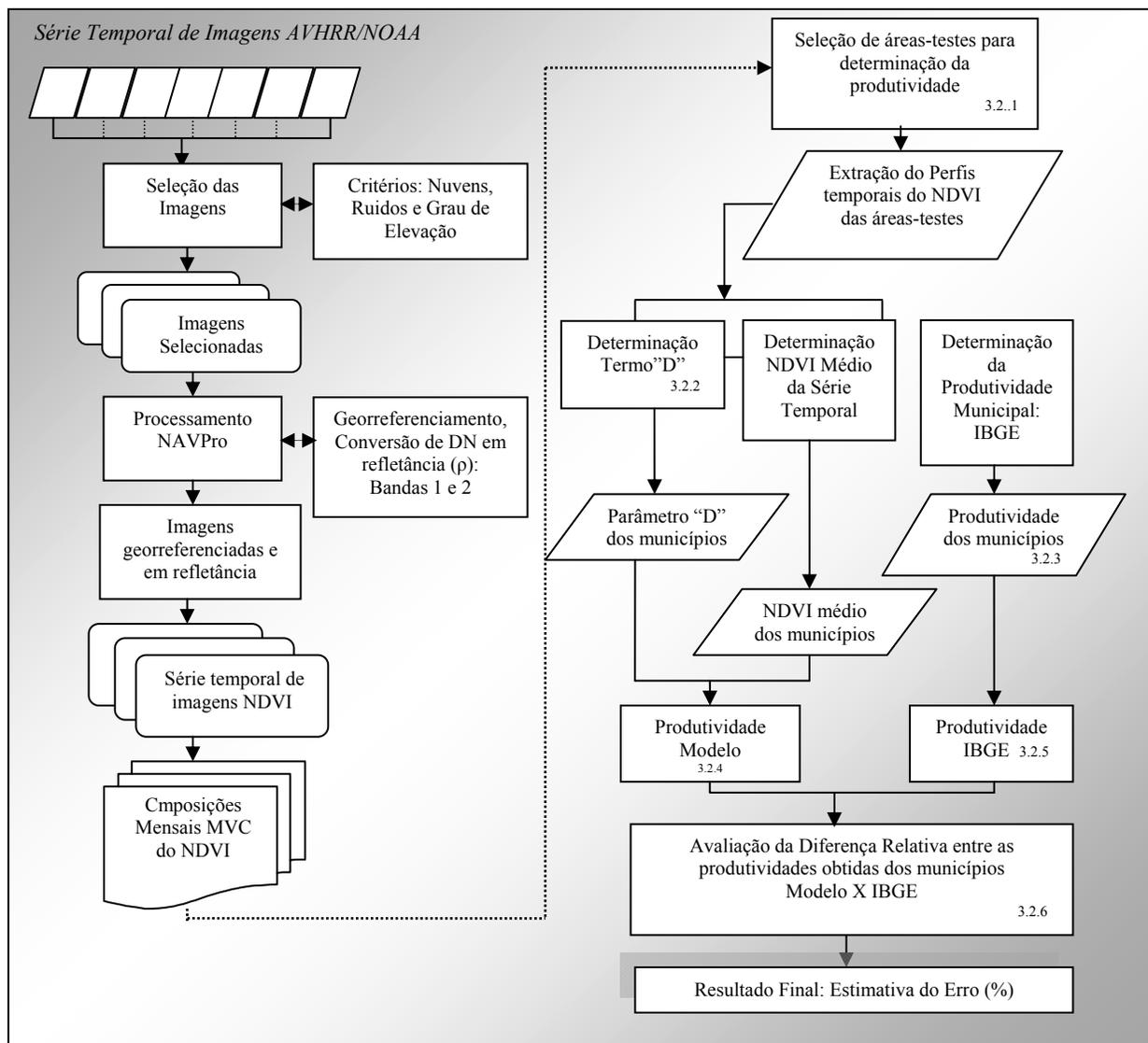
$P_{Cana}$  = número de pontos amostrais identificados como cana-de-açúcar no município;

$p_{Amostra}$  = número total de pontos amostrais no município, igual a 100 pontos neste estudo;

$A_{munc}$  = área total do município (ha).

### 3.2 Segunda Etapa: Avaliação da correlação entre o NDVI, Dias após o corte (D) e Produtividade.

A Figura 14 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada para obtenção da produtividade da cana-de-açúcar baseado na utilização do modelo fenológico-espectral, proposto por PELLEGRINO (2001).



**Figura 14. Metodologia adotada na obtenção da produtividade através do modelo fenológico-espectral proposto por PELLEGRINO (2001) e posterior comparação com estimativas oficiais – IBGE.**

### ***3.2.1 Seleção das áreas-testes visando à determinação da produtividade***

Para aplicação do modelo fenológico-espectral, na série temporal de imagens MVC/NDVI, foram selecionados os mesmos municípios do item 3.1.7, como áreas-testes.

### ***3.2.2 Extração do perfil temporal do NDVI dos municípios analisados e determinação do parâmetro “Dias Após o Corte - Termo D”***

Os perfis temporais do NDVI dos dez municípios selecionados foram gerados considerando-se apenas os pixels mapeados com a cultura, a partir da aplicação do algoritmo descrito no item 3.1.3. A determinação do termo D está diretamente relacionada, com o perfil que expressa os pontos de mínimo e máximo valores do NDVI e o período mensal em que esses extremos ocorreram.

### ***3.2.3 Determinação da Produtividade dos municípios selecionados***

A produtividade dos municípios foi determinada via modelo fenológico-espectral, baseado na informação do perfil temporal do NDVI e no intervalo de dias após o corte - variável “D” e através dos dados de produção e área plantada obtidos do IBGE, para as cinco safras estudadas.

### ***3.2.4 Via Modelo Espectral-Fenológico***

A estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, para os municípios considerados na análise, foi realizada utilizando-se as equações que combinam dados do ciclo da cultura, expresso em dias após o corte (D) e o NDVI, apresentados no item 2.4.1.

### ***3.2.5 Via estimativas realizadas por órgãos oficiais: IBGE***

Os dados para o cálculo da produtividade determinada pelo IBGE, para os dez municípios, foram obtidos através de dois parâmetros, fornecidos pelo órgão de

monitoramento agrícola: área plantada e quantidade produzida de cana-de-açúcar, fornecidos pelo sistema de banco de dados agregados - SIDRA<sup>iii</sup>, correspondentes a cada ano-safra analisado.

### **3.2.6 Cálculo da Diferença Relativa (%): Comparação entre as estimativas de produtividade do modelo e a produtividade oficial – IBGE**

O cálculo de diferença relativa ( $Dif_{relativa}$ ), em porcentagem, entre a estimativa de produtividade obtida com o modelo fenológico-espectral ( $PROD_{MODEL}$ ) e a estimativa oficial ( $PROD_{IBGE}$ ) fornecida pelo IBGE por município foi obtido a partir da Equação 18.

$$Dif_{relativa}(\%) = \left( \left( \frac{Prod_{IBGE} - Prod_{MODEL}}{Prod_{IBGE}} \right) \right) * 100 \quad \text{Eq.(18)}$$

Como a análise foi realizada de forma pareada entre duas estimativas de área, a diferença relativa é equivalente ao coeficiente de variação. Baseado nisso, para avaliação dos resultados das comparações, foi adotada a classificação de PIMENTEL-GOMES (2000), em que a diferença relativa é considerada baixa quando for menor que 10%, média de 10% a 20%, alta de 20% a 30% e muito alta quando for maior que 30%.

### **3.3 Análises Estatísticas dos dados**

A análise estatística dos resultados obtidos foi realizada de duas maneiras, através da análise de variância e análise de regressão, utilizadas respectivamente na primeira e segunda etapa do trabalho. Para análise estatística foi utilizado o programa computacional MINITAB (MINITAB, 1998).

---

<sup>iii</sup> <http://www.sidra.ibge.gov.br/>

### **3.3.1 Análise de Variância**

As imagens amplitude, termo aditivo e fase, obtidas a partir da aplicação da análise harmônica na série temporal de imagens MVC/NDVI para cada ano-safra foram submetidas à análise de variância para testar a significância das médias obtidas por ano-safra.

### **3.2.2 Análise de Regressão**

A análise de regressão foi utilizada no trabalho, para gerar dois modelos a partir da resposta da produtividade para cada município, levando-se em consideração o termo “D” obtido com o menor erro relativo. Os modelos foram desenvolvidos baseados na resposta das safras 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07, e posteriormente testados na safra 07/08. O primeiro modelo, chamado *Modelo1\_MédiaSafras*, considera a média do termo “D”, sem distinção dos municípios nas quatro safras, ou seja, qual o “D” médio obtido em cada ano-safra. Já o segundo modelo, ou *Modelo 2\_MédiaMunicípio*, ao contrário do anterior, considera a resposta do termo “D” para cada município em cada ano-safra e tem como objetivo, gerar uma equação que represente cada localidade, baseada no menor erro relativo encontrado entre a estimativa de produtividade obtida através do modelo fenológico-espectral e a considerada oficial fornecida pelo IBGE. Para avaliar a viabilidade das equações geradas na regressão, a partir da metodologia proposta, os resultados determinados foram comparados com a produtividade oficial.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do trabalho, apresentados a seguir, foram divididos em três partes:

- 4.1 *Primeira Etapa:* Seleção da série temporal das imagens, que incluiu o georreferenciamento e a geração das composições mensais de máximo valor do índice de vegetação – MVC/NDVI.
- 4.2 *Segunda Etapa:* Aplicação do algoritmo da análise harmônica e geração das imagens termo aditivo, amplitude, fase e variância, que possibilitaram a identificação das áreas com cana-de-açúcar para cada ano-safra analisado.
- 4.3 *Terceira Etapa:* Avaliação e ajuste do modelo fenológico-espectral, que correlaciona informações espectrais, obtidas a partir da série temporal de imagens NDVI/AVHRR, e dados da cultura na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar por ano-safra e avaliação e/ou comparação com as estimativas realizadas pelo IBGE.

#### 4.1 Primeira Etapa: Seleção e processamento da série temporal de imagens NDVI/AVHRR

Com o resultado do processamento das imagens AVHRR/NOAA-17, foi selecionada uma série temporal composta de 766 imagens, corrigidas radiometricamente, geometricamente e com delimitação e/ou identificação de nuvens, para gerar as composições de máximo valor do NDVI, dos cinco anos-safra considerados.

A Tabela 6 apresenta o total mensal e anual das imagens corrigidas em cada ano-safra para a área em estudo. É possível perceber que nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro obtiveram-se poucas imagens corrigidas, pois são meses da estação chuvosa, e nesta época as imagens apresentam grande cobertura de nuvens. O contrário acontece nos meses de julho e agosto, considerados secos, onde o número de imagens processadas é elevado em relação aos demais meses.

**Tabela 6. Número de imagens utilizadas na geração das composições mensais de máximo valor (MVC/NDVI).**

| <i>Mês</i>         | <i>Safras</i> |              |              |              |              | <i>Total Mensal</i> |
|--------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
|                    | <i>03/04</i>  | <i>04/05</i> | <i>05/06</i> | <i>06/07</i> | <i>07/08</i> |                     |
| <i>Abril</i>       | 15            | 06           | 20           | 20           | 20           | <b>81</b>           |
| <i>Mai</i>         | 19            | 04           | 18           | 18           | 20           | <b>79</b>           |
| <i>Junho</i>       | 17            | 05           | 18           | 21           | 19           | <b>80</b>           |
| <i>Julho</i>       | 18            | 08           | 23           | 21           | 18           | <b>88</b>           |
| <i>Agosto</i>      | 17            | 12           | 19           | 20           | 24           | <b>92</b>           |
| <i>Setembro</i>    | 07            | 12           | 11           | 09           | 24           | <b>63</b>           |
| <i>Outubro</i>     | 15            | 03           | 09           | 05           | 20           | <b>52</b>           |
| <i>Novembro</i>    | 10            | 05           | 11           | 13           | 12           | <b>51</b>           |
| <i>Dezembro</i>    | 03            | 03           | 06           | 07           | 15           | <b>34</b>           |
| <i>Janeiro</i>     | 02            | 07           | 12           | 01           | 07           | <b>29</b>           |
| <i>Fevereiro</i>   | 05            | 12           | 09           | 16           | 07           | <b>49</b>           |
| <i>Março</i>       | 06            | 16           | 16           | 19           | 11           | <b>68</b>           |
| <b>Total Anual</b> | <b>134</b>    | <b>93</b>    | <b>172</b>   | <b>170</b>   | <b>197</b>   | <b>766</b>          |

Vale ressaltar que embora a safra 03/04 tenha apresentado um total de 134 imagens, processadas e/ou corrigidas, ela se caracterizou pela presença de composições geradas a partir de um número reduzido de imagens, o que aumenta a área de pixels inaptos no estado, principalmente nos meses de dezembro a março. Já a safra 04/05, apresentou um número reduzido de imagens em relação à safra anterior, com aumentou das áreas inaptas no estado concentradas nos meses como maio, junho, julho, novembro e dezembro.

Para os anos-safra 05/06, 06/07 e 07/08, observou-se um aumento gradativo do total de imagens, o que está diretamente relacionado com a troca da antena de recepção das imagens AVHRR/NOAA, em 2005, por uma mais moderna, cuja característica principal é a diminuição da quantidade de ruídos.

## 4.2 *Segunda Parte: Aplicação do algoritmo da análise harmônica na série de imagens MVC/NDVI*

### 4.2.1 *Análise harmônica da série de imagens MVC/NDVI*

Como resultado da aplicação do algoritmo da análise harmônica, foram geradas as imagens termo aditivo, amplitude, fase e variância para cada ano-safra, a partir do algoritmo implementado, em linguagem *IDL* e executado em ambiente *ENVI 4.3*. Os dados de entrada necessários para a geração das imagens relacionadas acima, para um número *N* de harmônicos, foram meta-arquivos contendo conjuntos de imagens separados por ano-safra (Tabela 7).

**Tabela 7. Total de imagens utilizadas na composição dos meta-arquivos de entrada no algoritmo da análise harmônica e harmônicos resultantes.**

| <i>Ano-Safra</i> | <i>Meta-arquivo:<br/>Nº de composições<br/>MVC/NDVI</i> | <i>Nº de harmônicos<br/>resultantes - N</i> |
|------------------|---|---|
| <i>03/04</i>     | 12  | 06  |
| <i>04/05</i>     | 24  | 12  |
| <i>05/06</i>     | 36  | 18  |
| <i>06/07</i>     | 48  | 24  |
| <i>07/08</i>     | 60  | 30  |

O número máximo de harmônicos que pode ser calculado é igual ao número de imagens (*n*) dividido por dois ( $n/2$ ). A separação, por ano-safra está diretamente relacionada à caracterização da dinâmica da cana-de-açúcar nos municípios estudados, bem como à evolução dessas áreas ao longo do tempo (cinco safras). Para avaliar essa dinâmica de crescimento, cada meta-arquivo gerado numa dada safra é composto da sua série de imagens e

da série anterior, isso equivale, que tomando, por exemplo, a safra 04/05, o meta-arquivo gerado irá conter uma série total de 24 imagens, sendo este arquivo gerado da junção das 12 imagens da safra 03/04 e das 12 imagens correspondentes a safra em questão, no caso 04/05. Esta metodologia foi adotada sucessivamente para as demais safras estudadas.

As imagens termo aditivo representam a média aritmética dos valores de NDVI na série e, conseqüentemente, indicam o vigor total da vegetação no período analisado. As imagens amplitude indicam a variação máxima do NDVI para cada ano-safra. Altos valores de amplitude indicam um alto grau de variação temporal do NDVI (PARDI LACRUZ, 2006).

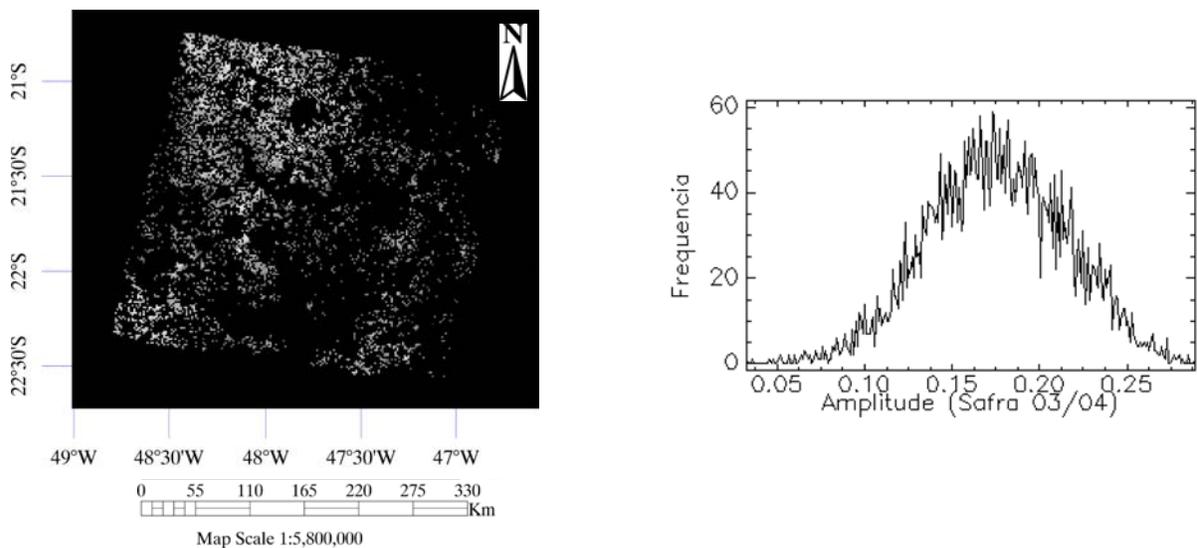
Coberturas vegetais diferentes exibem respostas distintas. As áreas agrícolas, especificamente, apresentam valores de amplitude elevados. Quando esses valores apresentam-se mais elevados no primeiro termo, indicam um padrão unimodal e, no segundo termo, um padrão semi-anual da cultura (JAKUBAUSKAS et al., 2002). A terceira imagem gerada no processamento foi a imagem variância, que está diretamente relacionada com a percentagem de informação do alvo contida num dado harmônico. Por fim, as imagens fase ou ângulo de fase representam o tempo ao longo da série em que acontece o máximo valor da amplitude. Os valores resultantes das imagens fase variam numa escala de 0° a 360° e, comumente, estão associadas com os meses do ano, em intervalos de aproximadamente 30°. A seguir são apresentados os resultados da análise harmônica, para cada ano-safra.

#### **4.2.2 *Análise harmônica - Safra 03/04***

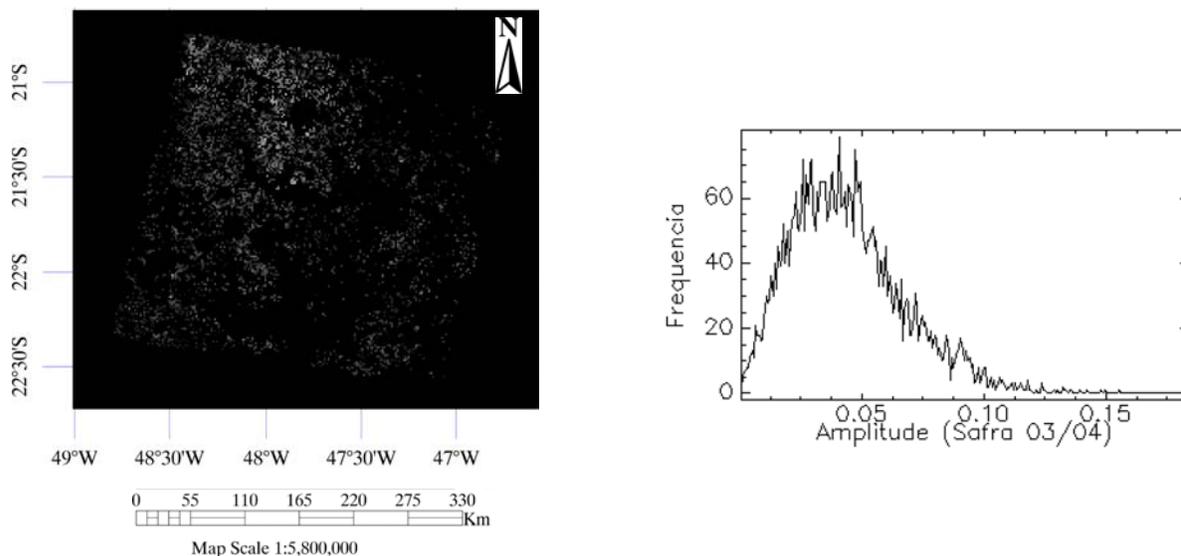
##### **4.2.2.1 *Imagens Amplitude e Variância - Safra 03/04***

As áreas com cana-de-açúcar, tomadas como referência (*item 3.1.6 página 40*), possui altos valores de amplitude e variância no primeiro harmônico. No segundo harmônico é possível observar a diminuição desses valores (*anexo item 7.6: figuras 67.b e 6.7d*). A média da amplitude, para os pixels mapeados com cana-de-açúcar, foi de 0,17 (valor mínimo de 0,03 e máximo 0,28) e 0,04 (valor mínimo de 0,0 e máximo 0,18), respectivamente, para o primeiro e segundo harmônico. Para as imagens variância esta média foi de 0,59 no primeiro harmônico e 0,15 no segundo harmônico. Vale ressaltar que devido à quantidade reduzida de imagens, na composição MVC/NDVI do mês de janeiro/04 (Tabela 6), foi necessário substituí-la pela média aritmética, entre as imagens composição de dezembro/03 e fevereiro/04.

As Figuras 15 e 16 apresentam a amplitude e o histograma dos pixels com cana-de-açúcar do primeiro e do segundo harmônicos na região tomada como referência, no ano-safra analisado.



**Figura 15. Amplitude e histograma do primeiro harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 03/04.**

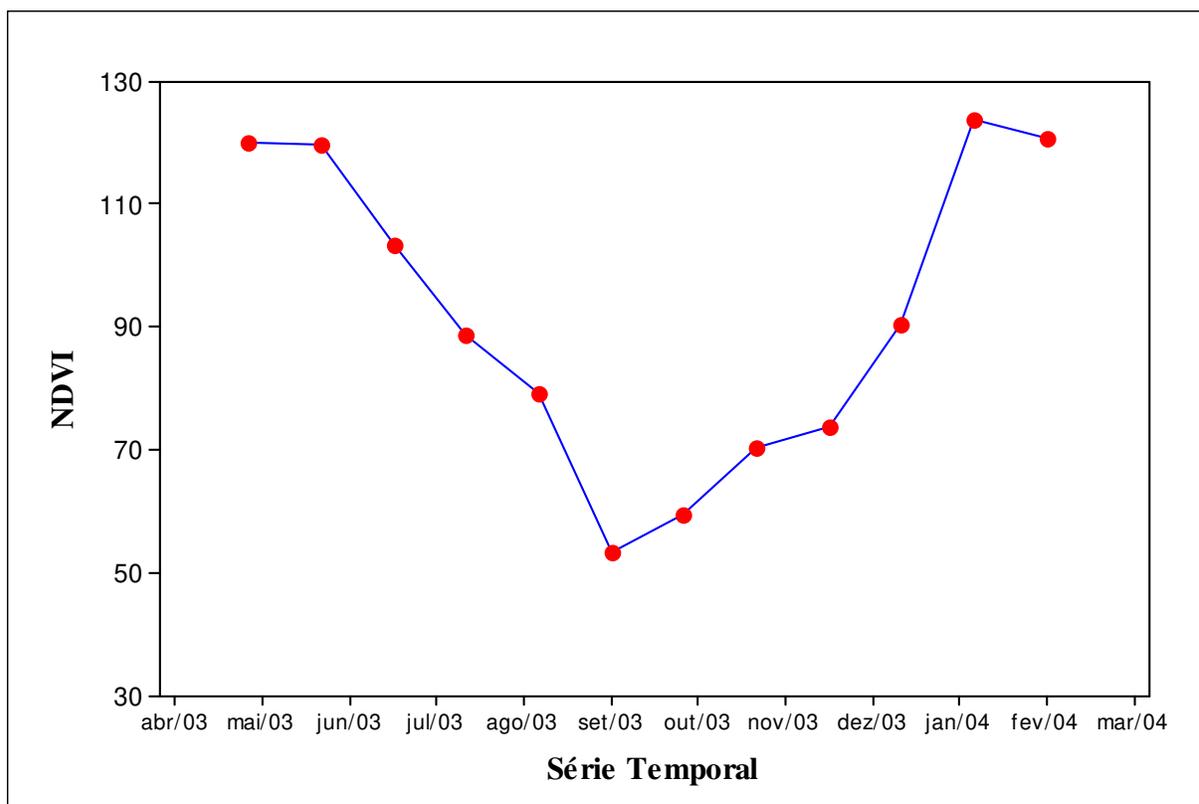


**Figura 16. Amplitude e histograma do segundo harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 03/04.**

#### 4.2.2.2 Imagens Fase e Termo Aditivo - Safra 03/04

As imagens fase (*anexo item 7.6: figura 67.e*) são mais sensíveis, em relação à quantidade de imagens utilizadas na série temporal, e não possibilitaram uma boa discriminação sobre o comportamento da cana-de-açúcar na área em estudo. Já a imagem termo aditivo (*anexo item 7.6: figura 67.f*), que representa a média dos valores NDVI, indicam que para o ano-safra considerado o valores mínimo e máximo dos pixels com cana-de-açúcar foram, respectivamente, 0,26 e 0,67.

A partir do perfil temporal dos valores médios do NDVI (Figura 17), é possível identificar os períodos de mínimo e máximo, vigor vegetativos da cultura, que ocorrem respectivamente nos meses de setembro/03 e janeiro/04.



**Figura 17. Perfil temporal dos pixels, com cana-de-açúcar, para a safra 03/04.**

A (Figura 18.a) mostra a função co-seno  $y_t$  calculada para os seis harmônicos, derivados da série temporal de imagens, e permite verificar que o primeiro harmônico apresenta valores elevados de amplitude em relação aos demais harmônicos, sendo a curva

obtida típica de culturas anuais. Aproximadamente 64% da variância das áreas com cana-de-açúcar no estado, (Figura 18.b), está representada no primeiro harmônico, diminuindo consideravelmente nos harmônicos seguintes.

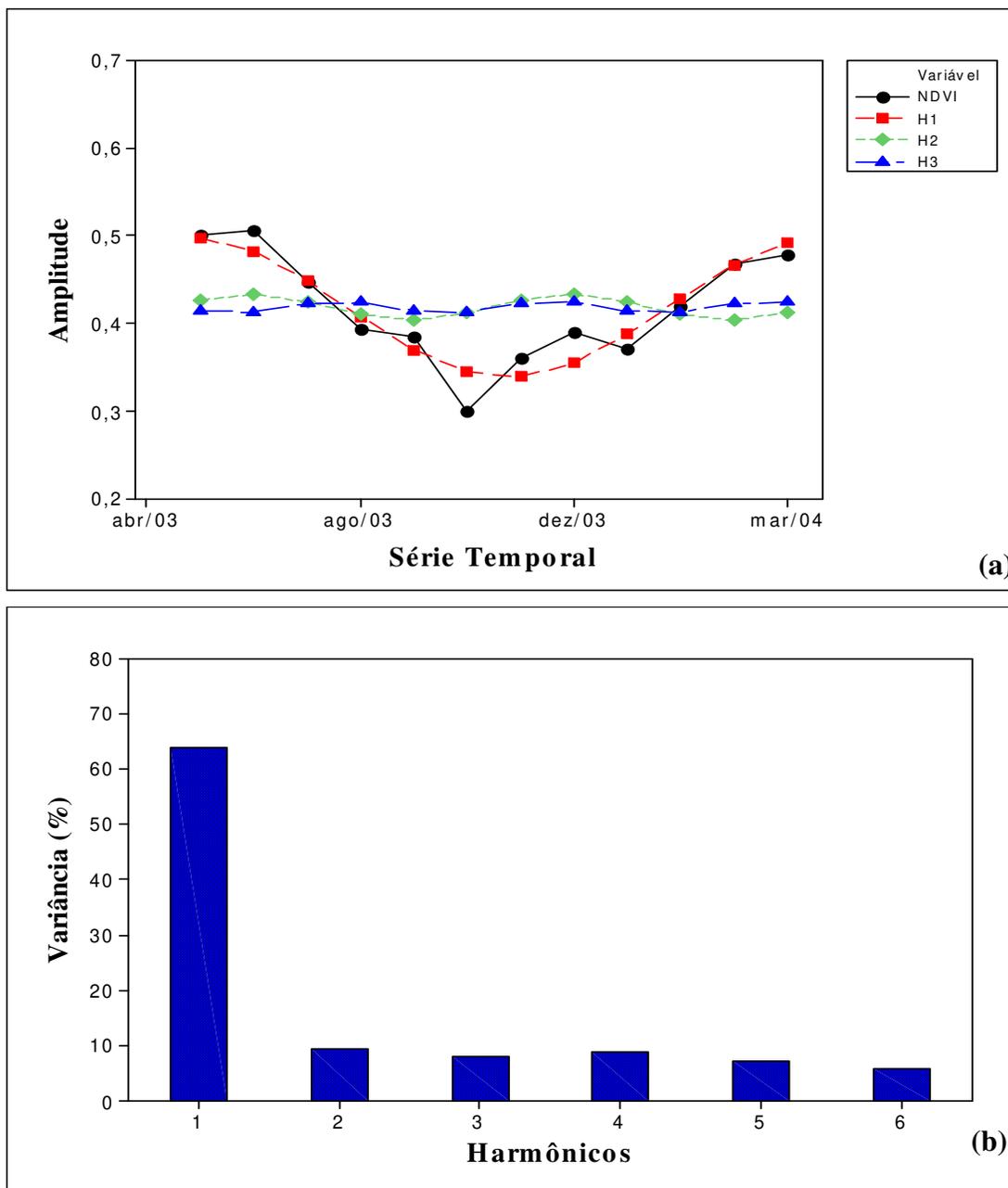


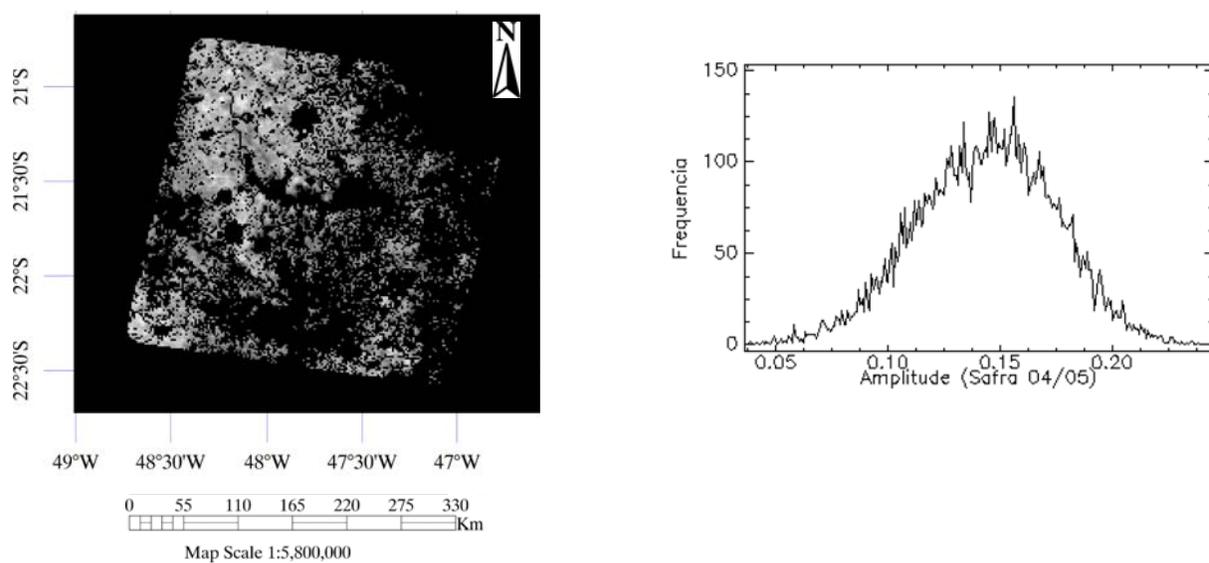
Figura 18. Curva de ajuste dos valores do NDVI (a) e porcentagem de informação (b), correspondente às imagens variância para cada harmônico, da safra 03/04.

### 4.2.3 Análise harmônica - Safra 04/05

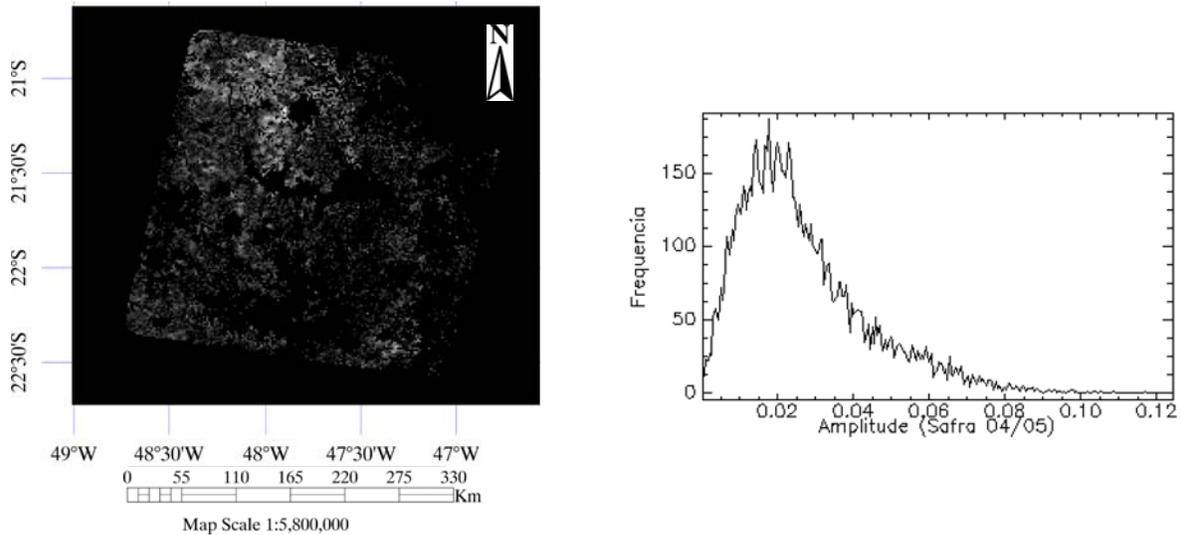
Para a safra 04/05, foram utilizadas 24 imagens, correspondentes à junção das séries temporais, dos anos-safra 03/04 e 04/05. Esta associação e as demais utilizadas nas próximas safras tiveram por finalidade avaliar o crescimento das áreas com a cultura ao longo do tempo nos municípios selecionados.

#### 4.2.3.1 Imagens Amplitude e Variância- Safra 04/05

À medida que a série temporal de imagens aumenta, ocorre um deslocamento na respostas dos harmônicos, em relação às áreas com cana-de-açúcar tomadas como referência. Na safra 04/05, o segundo harmônico, tanto das imagens amplitude, quanto das imagens variância, contiveram, praticamente a maioria da informação sobre a cultura analisada, e consequentemente esses harmônicos são os representativos na identificação da cultura. O valor médio da imagem amplitude, para os pixels com cana-de-açúcar, no segundo harmônico foi de 0,14, com valor mínimo de 0,03 e máximo de 0,23 (item 7.7: figura 68.a). Para as imagens variância o segundo harmônico, apresentou valor médio de 0,71, mínimo de 0,08 e máximo de 0,94 (item 7.7: figura 68.c). As Figuras 19 e 20 apresentam a amplitude e o histograma dos pixels com cana-de-açúcar do segundo e terceiro harmônicos, respectivamente, na região tomada como referência, na safra em questão.



**Figura 19. Amplitude e histograma do segundo harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 04/05.**



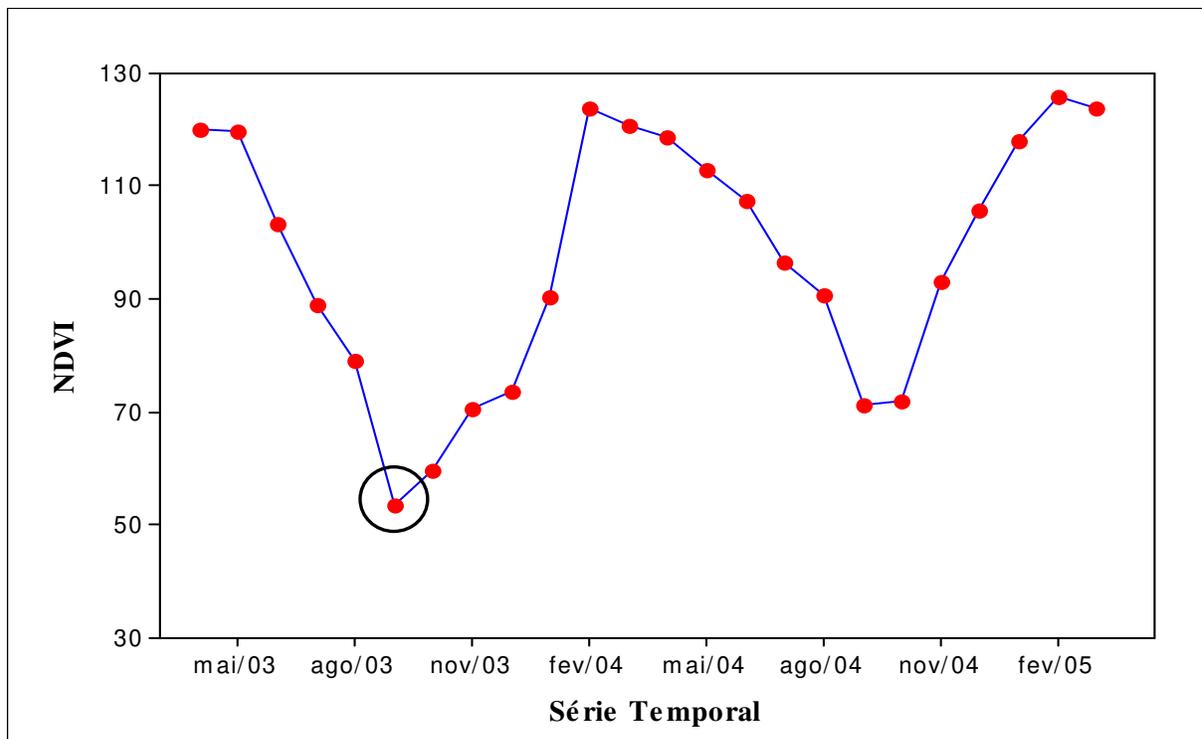
**Figura 20. Amplitude e histograma do terceiro harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 04/05.**

#### **4.2.3.2 Imagens Fase e Termo Aditivo - Safra 04/05**

Com o aumento do número de imagens na série temporal, há uma melhora na resposta da imagem fase em relação à safra anterior. Na região Nordeste do estado, onde concentram-se os pixels tomados como referência, o máximo valor da amplitude ocorre no mês de abril, sendo o ângulo de fase, da imagem, igual a  $18^\circ$  (item 7.7: figura 68.e).

Correlacionando-se, a resposta do ângulo de fase, com os meses da série temporal de imagens AVHRR/NOAA, é possível afirmar que, o mês de abril está diretamente relacionado com a própria dinâmica de cultivo da cultura no estado, a partir desse mês, o crescimento vegetativo da cultura passa a ser reduzido, com o acúmulo de sacarose nos colmos e início da colheita no estado, que normalmente estende-se até o mês de outubro, com redução gradativa dos valores do NDVI. A média da imagem termo aditivo (item 7.7: figura 68.f), para os pixels com cana-de-açúcar tomados como referência foi de 0,48, com valor mínimo de 0,32 e máximo de 0,69.

A Figura 21 apresenta o perfil temporal do NDVI, para as safras 03/04 e 04/05. É possível perceber através dos valores médios do NDVI, que a safra 03/04 apresenta uma queda acentuada no valor do NDVI em comparação à safra 04/05. Esta variação não está relacionada à cultura e sim a problemas de detecção de nuvens, na composição de dezembro/03 e janeiro/04. Na safra 04/05, os valores médios do NDVI, não foram contaminados por nuvens e/ou ruídos, apresentando o perfil mais estável em relação à safra passada.



**Figura 21. Perfil temporal dos pixels, com cana-de-açúcar, para as safras 03/04 e 04/05.**

A (Figura 22.a) apresenta a função co-seno  $y_t$  calculada a partir da série temporal de imagens NDVI das safras 03/04 e 04/05. Observa-se o ajuste da curva, e o padrão unimodal da cultura ao longo das safras analisadas. Para as imagens variância, (Figura 22.b), cerca de 71,47% da variância das áreas com cana-de-açúcar no estado está representada no segundo harmônico, diminuindo, consideravelmente, nos demais harmônicos.

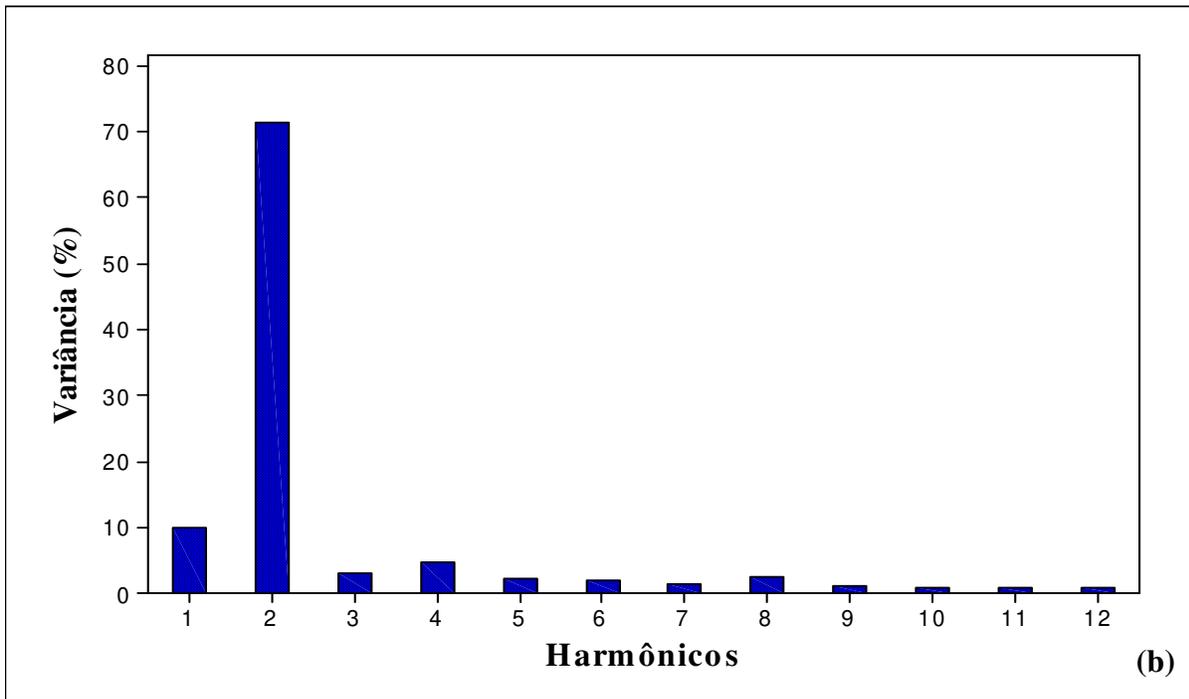
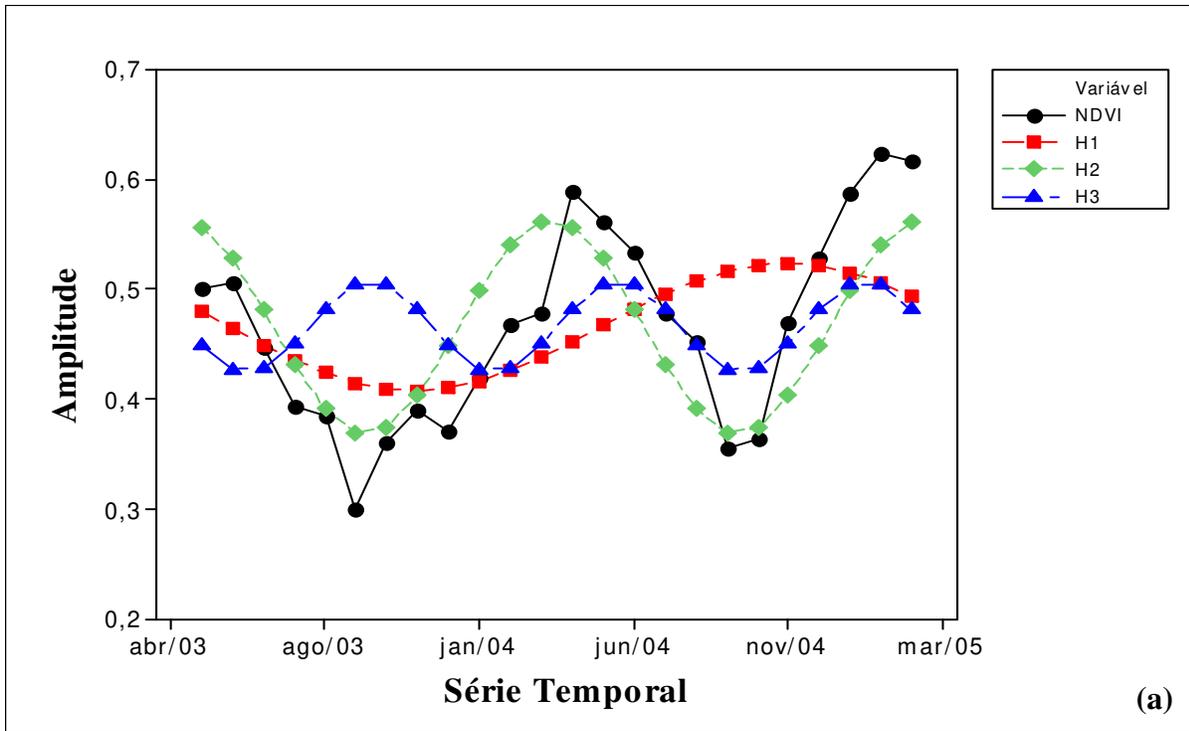


Figura 22. Curva de ajuste dos valores do NDVI (a) e porcentagem de informação (b), correspondente as imagens variância para cada harmônico, das safras 03/04 e 04/05.

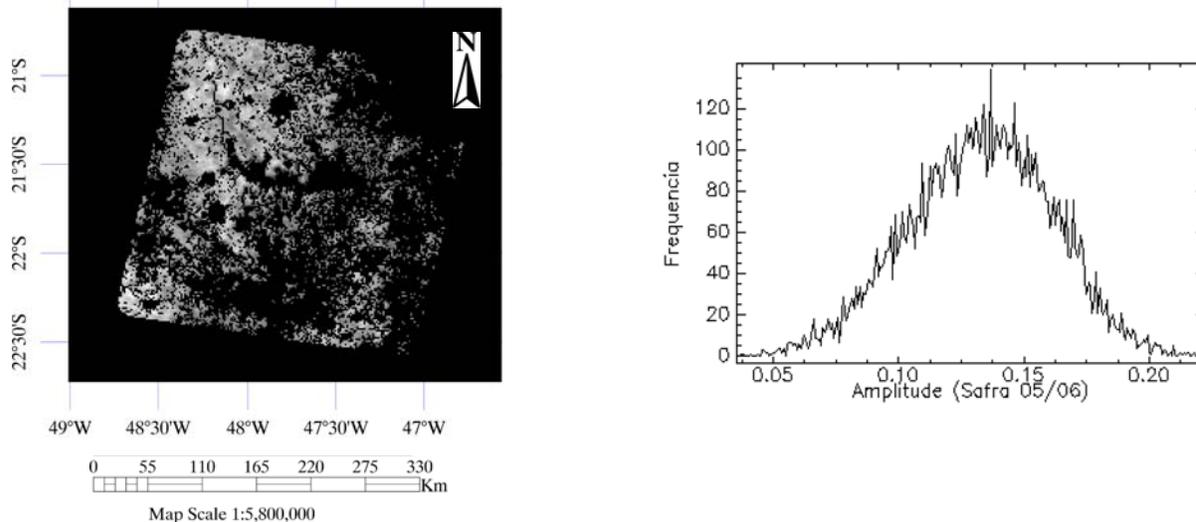
#### 4.2.4 Análise harmônica - Safra 05/06

A safra 05/06 foi composta de 36 imagens NDVI/MVC, representando a série temporal de abril/03 a março/06. Dezoito harmônicos foram gerados dessa série de imagens, cujos resultados são apresentados a seguir.

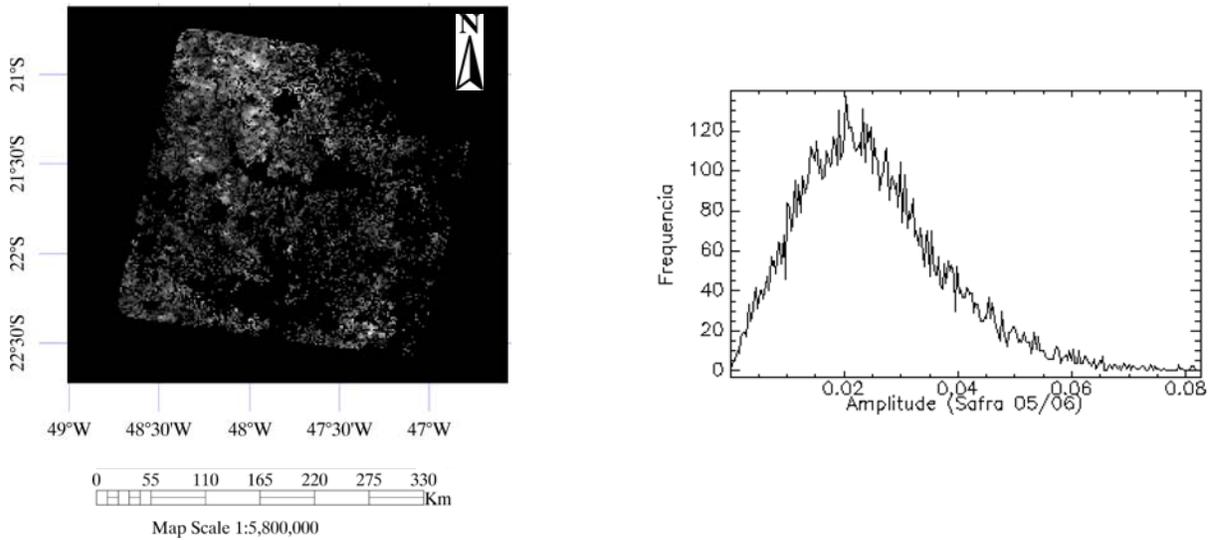
##### 4.2.4.1 Imagens Amplitude e Variância - Safra 05/06

O valor médio da imagem amplitude, para os pixels com cana-de-açúcar, no terceiro harmônico foi de 0,13, com valor mínimo de 0,03 e máximo de 0,22 (item 7.8: figura 69.a). Nas imagens variância (item 7.8: figura 69.c), o terceiro harmônico apresentou como resposta, valor médio de 0,67, com valor mínimo de 0,07 e máximo de 0,92.

As Figuras 23 e 24 apresentam a amplitude e o histograma dos pixels com cana-de-açúcar do terceiro e quarto harmônicos na região tomada como referência, na safra em questão.



**Figura 23. Amplitude e histograma do terceiro harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 05/06.**

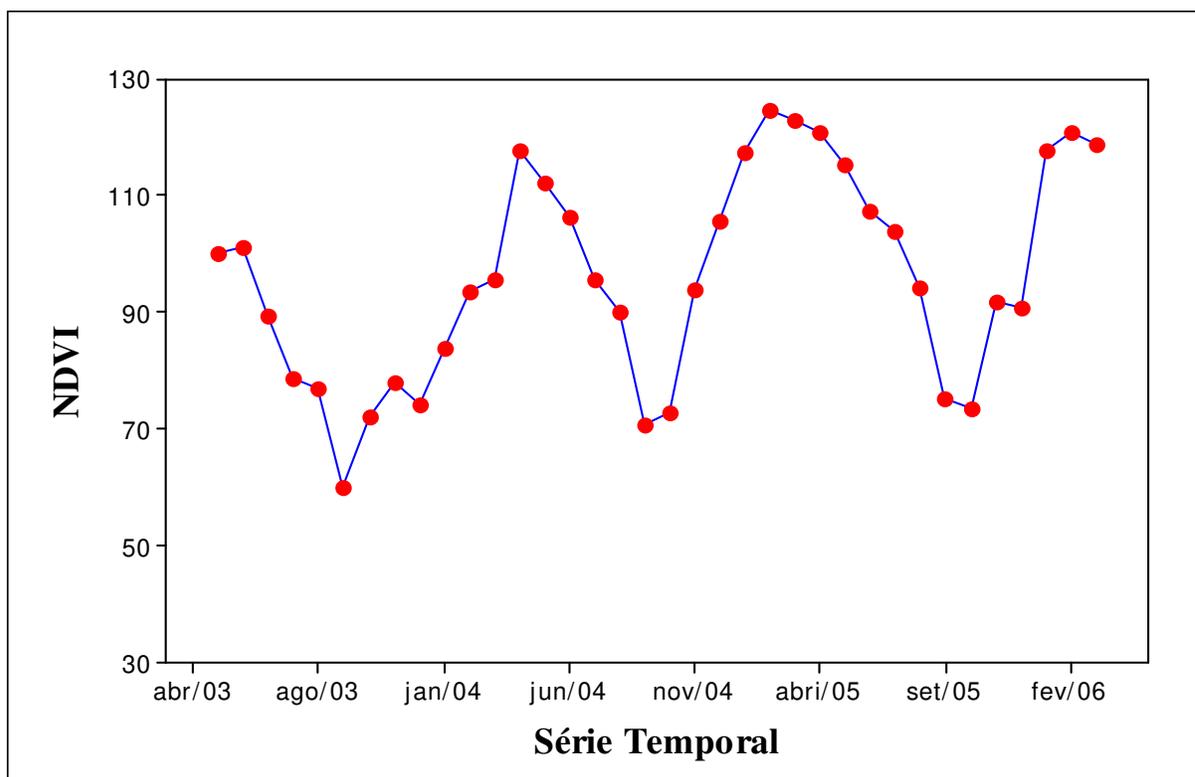


**Figura 24. Amplitude e histograma do quarto harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 05/06.**

#### ***4.2.4.2 Imagens Fase e Termo Aditivo - Safra 05/06***

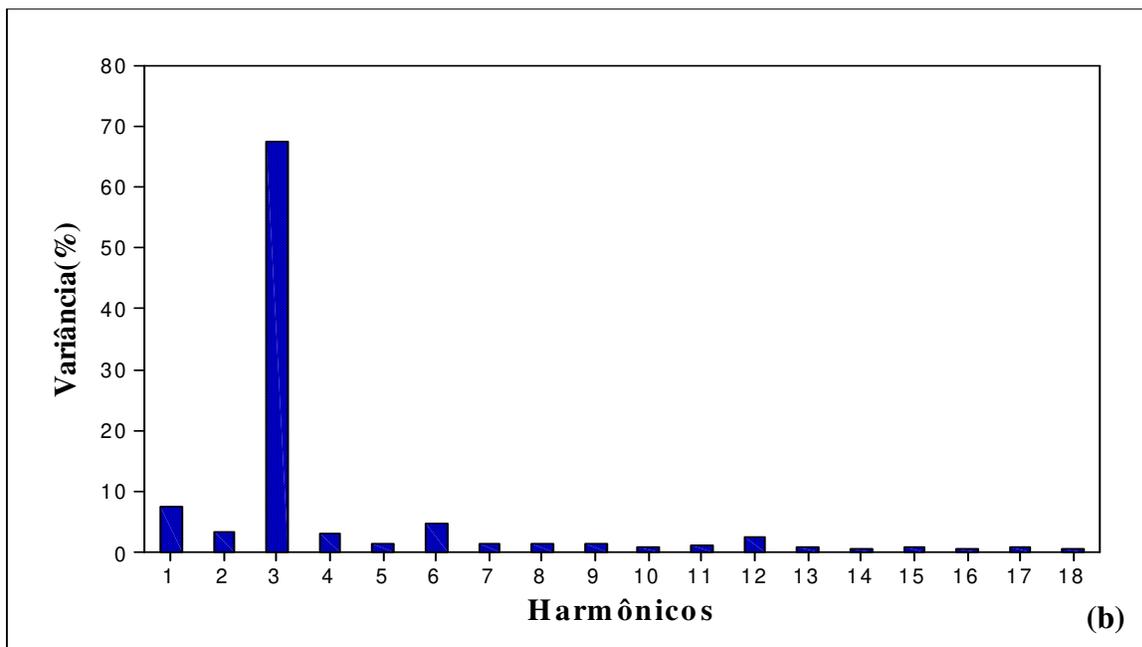
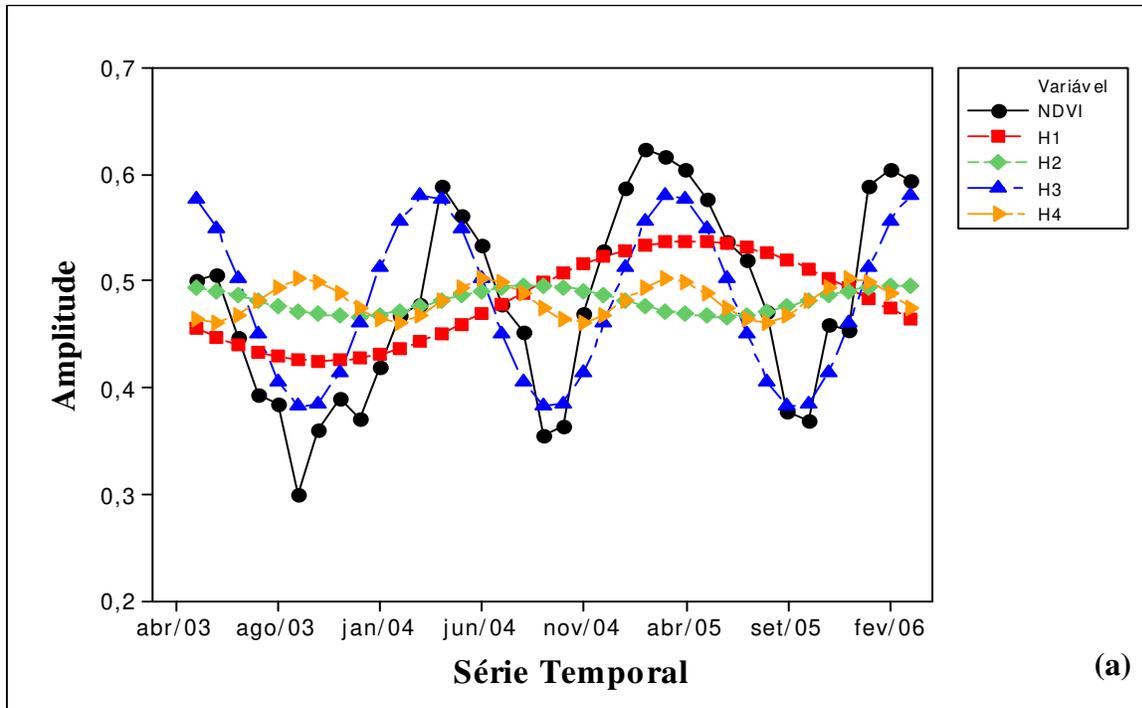
A resposta do ângulo fase (*item 7.8: figura 69.e*), para a safra 05/06, foi igual a  $23,77^\circ$ , indicando a tendência das maiores mudanças, estarem relacionadas ao mês de abril. Assim como na safra anterior, essa resposta na imagem fase está diretamente correlacionada com a diminuição dos valores do NDVI, até aproximadamente o mês de setembro e outubro. Quanto à imagem termo aditivo (*item 7.8: figura 69.f*), o valor médio para os pixels tomados como referência foi de 0,49, com valor mínimo de 0,29 e máximo de 0,67.

A Figura 25 apresenta o perfil temporal do NDVI, para os pixels da área mapeada com cana-de-açúcar no estado, resultante da série temporal de 36 imagens NDVI/MVC, correspondente à junção das safras 03/04, 04/05 e 05/06. Nota-se que a curva representativa, para a safra 05/06 é mais estável, quando comparadas com as safras anteriores. Esta resposta está diretamente relacionada com a qualidade das imagens composições MVC/NDVI, geradas no processamento, que não foram contaminadas pela presença de nuvens e ruídos ocasionados pelo sensor.



**Figura 25. Perfil temporal dos pixels, com cana-de-açúcar, para as safras 03/04, 04/05 e 05/06.**

A (Figura 26.a) apresenta a função co-seno  $y_i$  calculada a partir do perfil temporal do NDVI acima relacionado, no período de abril/03 a março/06. O ajuste da curva, expressa o padrão unimodal bem definido da cultura ao longo das safras analisadas (curva em vermelho). Para as imagens variância, (Figura 26.b), aproximadamente 67,5% da porcentagem de informação, em relação às áreas mapeadas com a cultura no estado, está contida no terceiro harmônico, com valores reduzidos nos demais harmônicos.



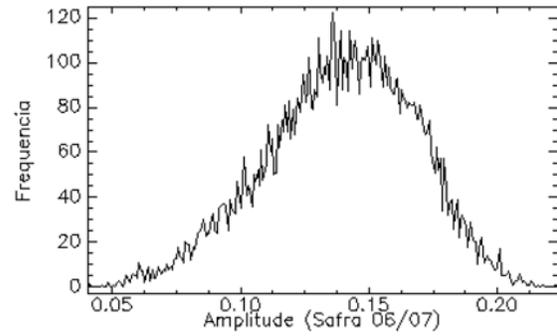
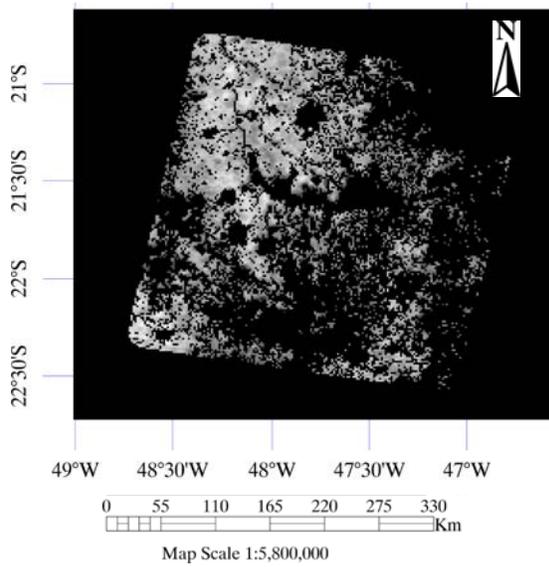
**Figura 26. Curva de ajuste dos valores do NDVI (a) e porcentagem de informação (b), correspondente as imagens variância para cada harmônico, das safras 03/04, 04/05 e 05/06.**

#### **4.2.5 *Análise harmônica - Safra 06/07***

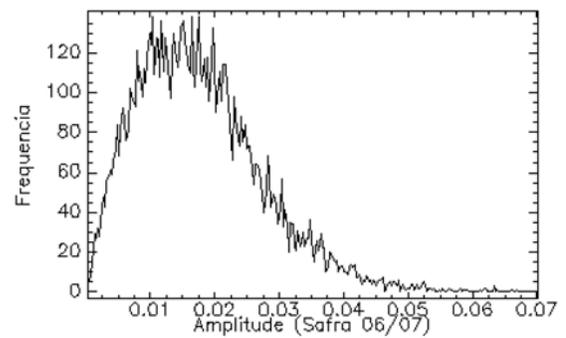
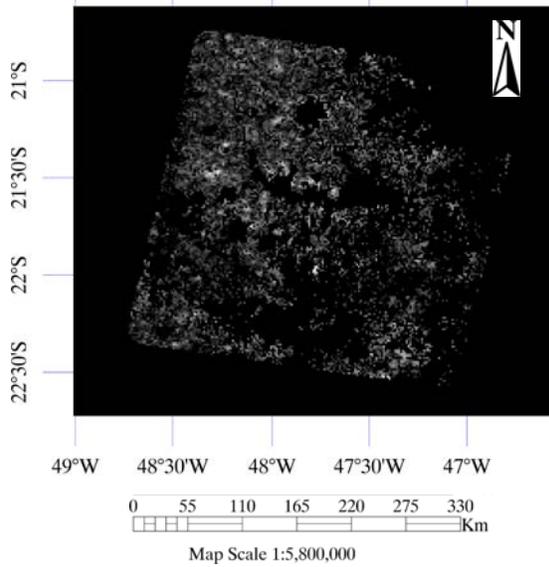
Na análise da safra 06/07, foram utilizadas 48 imagens composição NDVI/MVC, representando a série temporal de abril/03 a março/07. O número de harmônicos, gerados foi 24, sendo as imagens resultantes, da aplicação do algoritmo, interpretada a seguir.

##### **4.2.5.1 *Imagens Amplitude e Variância - Safra 06/07***

As áreas com cana-de-açúcar monitoradas, para a safra em questão, apresentam valores elevados de amplitude no quarto harmônico e baixo nos demais. O valor médio da amplitude (*item 7.9: figura 70.a*) para o quarto harmônico foi de 0,13, com valor mínimo e máximo de 0,04 e 0,22, respectivamente. As imagens variância (*item 7.9: figura 70.c e 70.d*), apresentaram a mesma característica que as imagens amplitude, quanto, à resposta para os pixels com cana-de-açúcar no estado, tomadas como referência. O valor médio da variância desses pixels foi de 0,68, com valor mínimo de 0,11 e máximo de 0,91. As Figuras 27 e 28 apresentam a amplitude e o histograma dos pixels com cana-de-açúcar do quarto e quinto harmônicos na região tomada como referência, na safra em questão.



**Figura 27. Amplitude e histograma do quarto harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 06/07.**

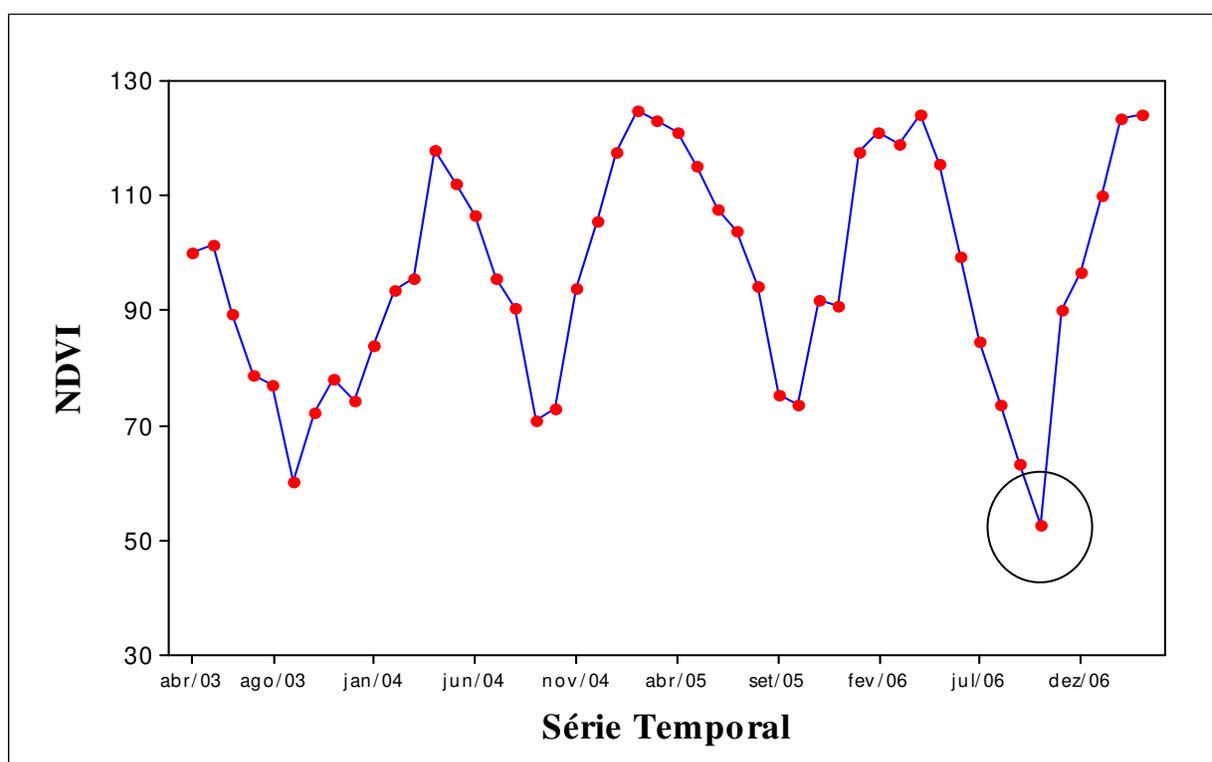


**Figura 28. Amplitude e histograma do quinto harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 06/07.**

#### 4.2.5.2 Imagens Fase e Termo Aditivo- Safras 06/07

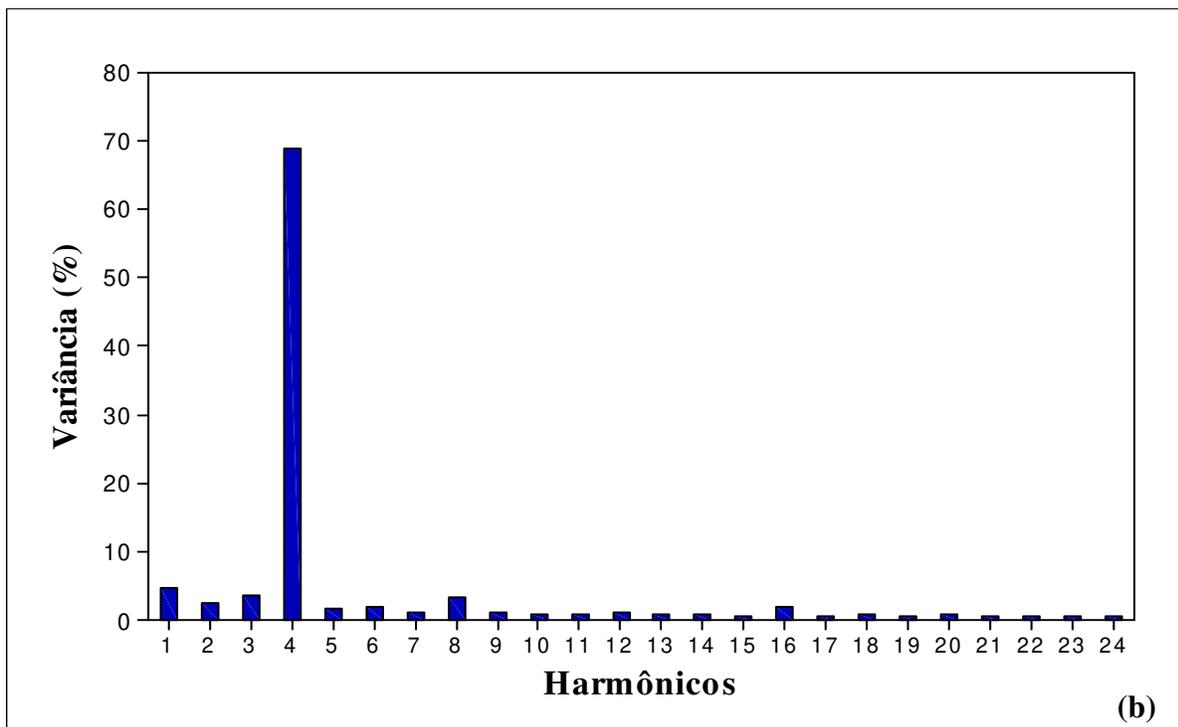
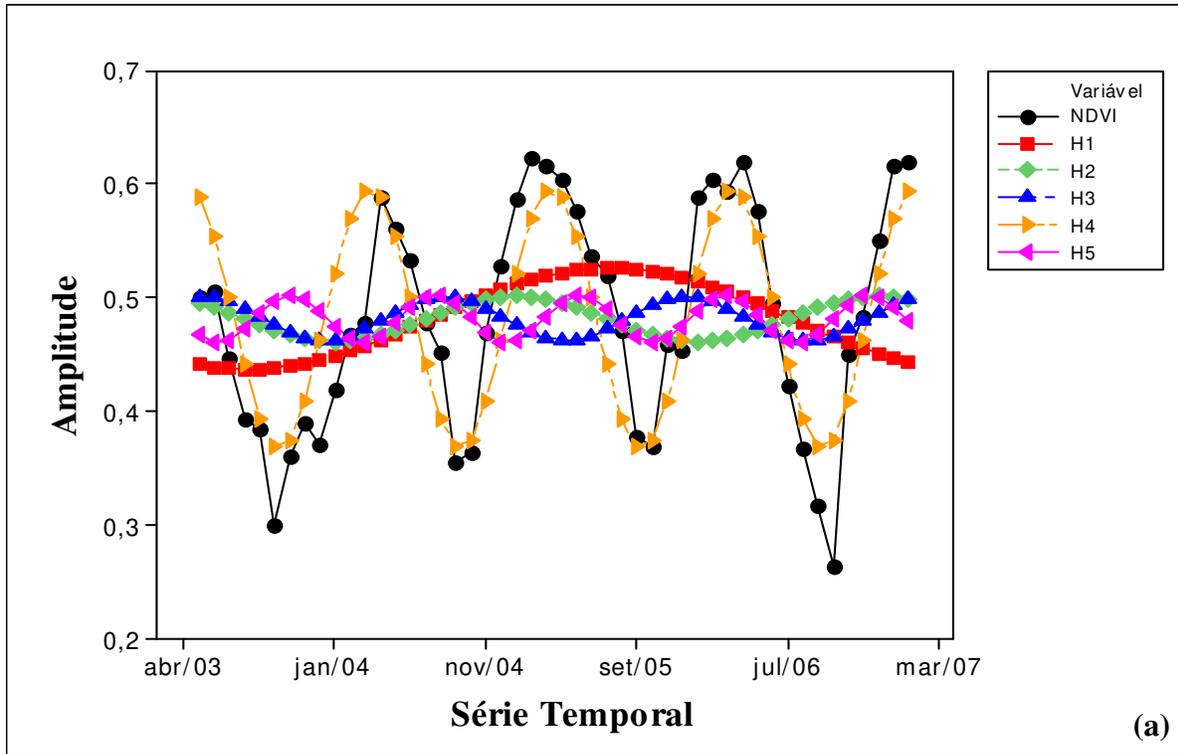
A resposta do ângulo fase (item 7.9: figura 70.e), para a safra 06/07 foi igual a  $25,23^\circ$ , indicando a mesma tendência, mostrada nas safras anteriores. Quanto à imagem termo aditivo (item 7.9: figura 70.f), o valor médio para os pixels tomados como referência foi de 0,49, com valor mínimo de 0,28 e máximo de 0,66.

A Figura 29 apresenta o perfil temporal do NDVI, das 48 imagens NDVI/MVC, representando as quatro safras analisadas. Nota-se um valor mínimo do NDVI, bem acentuado na composição de outubro/06.



**Figura 29. Perfil temporal dos pixels, com cana-de-açúcar, para as safras 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07.**

A (Figura 30.a) apresenta a função co-seno  $y_t$ , calculada a partir do perfil temporal do NDVI, acima relacionado. Aproximadamente 68% da resposta dos pixels com a cultura no estado, está representada no quarto harmônico, conforme a (Figura 30.b).



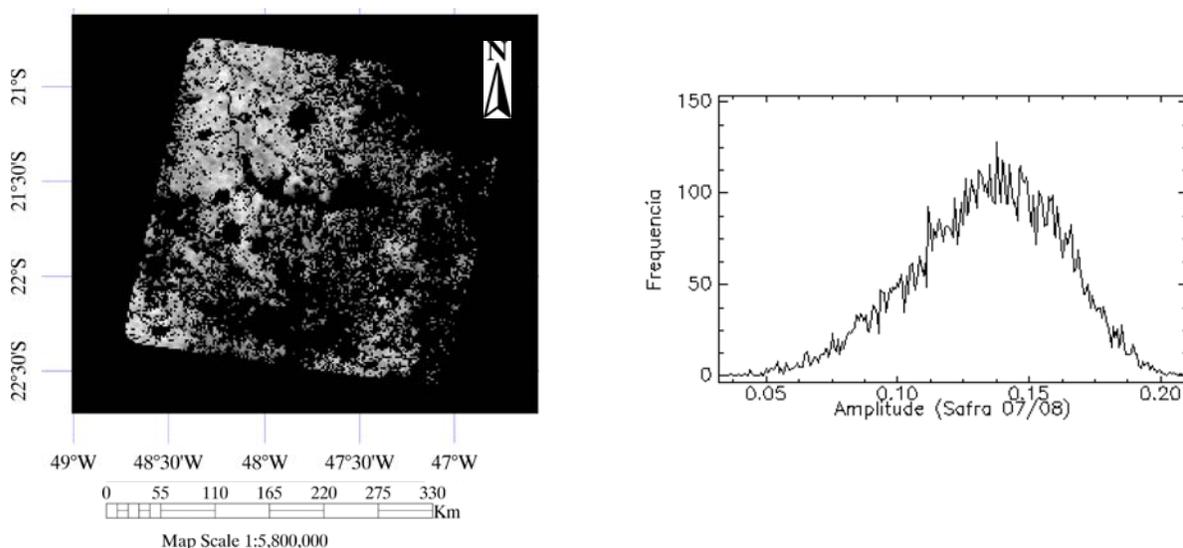
**Figura 30. Curva de ajuste dos valores do NDVI (a) e porcentagem de informação (b), correspondente as imagens variância para cada harmônico, das safras 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07.**

#### 4.2.6 Análise Harmônica - Safra 07/08

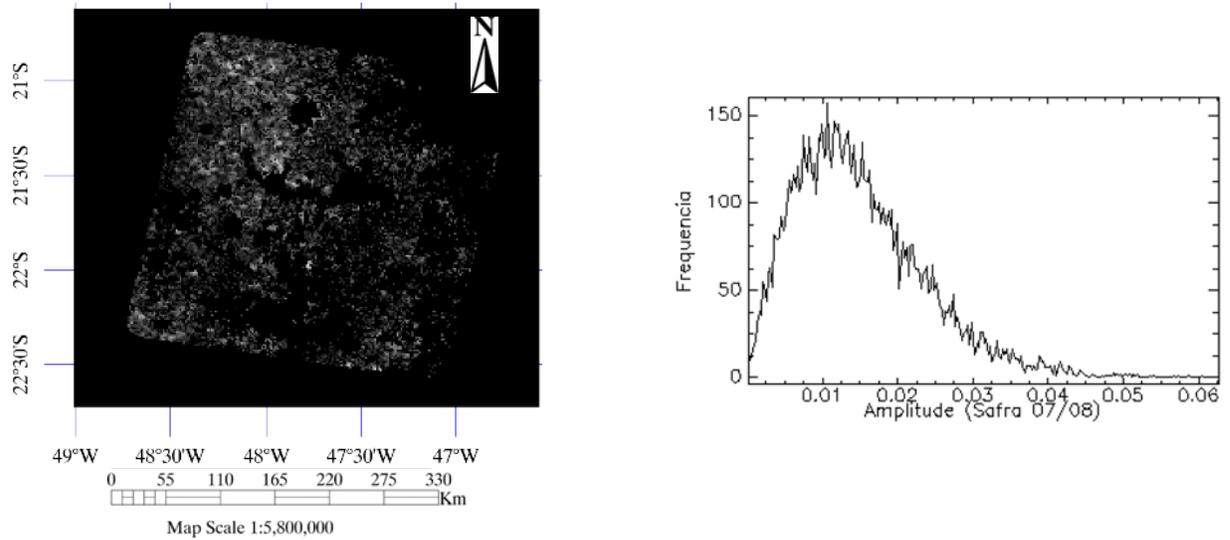
A última safra analisada é composta de 60 imagens, correspondente à série temporal das imagens NDVI/MVC, do período de abril/03 a março/08. A seguir, são apresentados os resultados da análise harmônica para os 30 harmônicos gerados dessa série de dados.

##### 4.2.6.1 Imagens Amplitude e Variância: Safra 07/08

O quinto harmônico das imagens amplitude (*item 7.10: figura 71.a*) foi o representativo na identificação das áreas com cana-de-açúcar no estado, para a safra em questão. Os pixels com a cultura tomados como referência apresentaram valor médio de 0,13, com mínimo de 0,03 e máximo de 0,21, para o quinto harmônico. As imagens variância apresentam a mesma resposta que as imagens amplitude, ou seja, para os pixels tomados como referência, o quinto harmônico, contém praticamente a variância total da série de dados, com diminuição nos demais harmônicos (*item 7.10: figura 71.c*). Para o quinto harmônico, o valor médio dos pixels com cana-de-açúcar foi de 0,66, com mínimo de 0,09 e máximo de 0,90. As Figuras 31 e 32 apresentam a amplitude e o histograma dos pixels com cana-de-açúcar do quinto e sexto harmônicos na região tomada como referência, no ano-safra analisado.



**Figura 31. Amplitude e histograma do quinto harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 07/08.**



**Figura 32. Amplitude e histograma do sexto harmônico dos pixels com a cultura da cana-de-açúcar tomados como referência, safra 07/08.**

#### **4.2.6.2 *Imagens Fase e Termo Aditivo: Safra 07/08***

A resposta do ângulo fase (*item 7.10: figura 71.e*), para a safra 07/08, foi igual a  $30,52^\circ$ , indicando a tendência das maiores mudanças, estarem relacionadas ao mês de abril. Quanto às imagens termo aditivo (*item 7.10: figura 71.f*), o valor médio para os pixels tomados como referência foi de 0,49, com valor mínimo de 0,29 e máximo de 0,67.



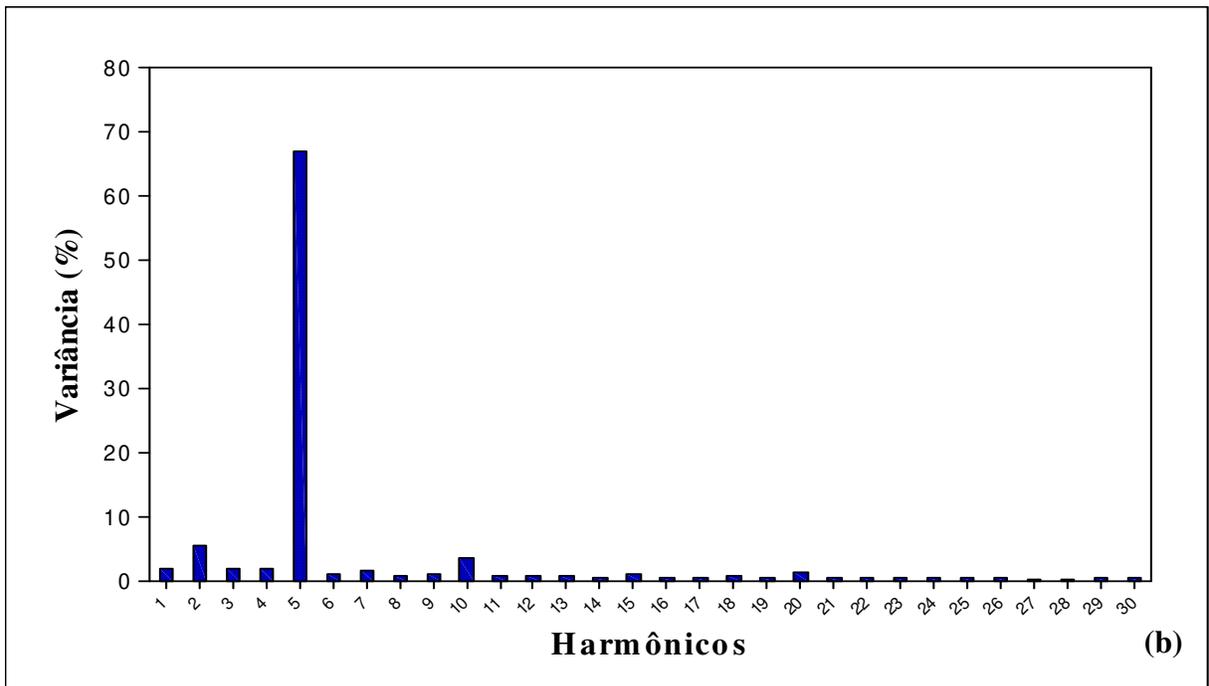
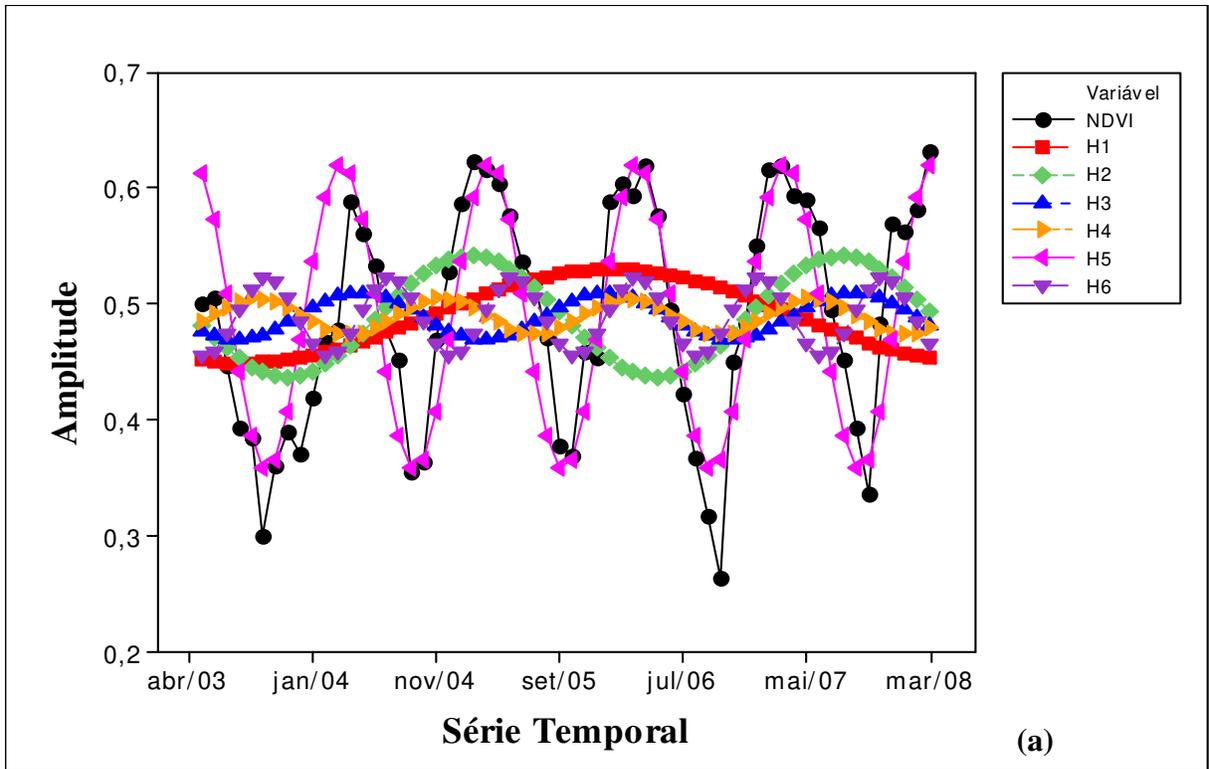
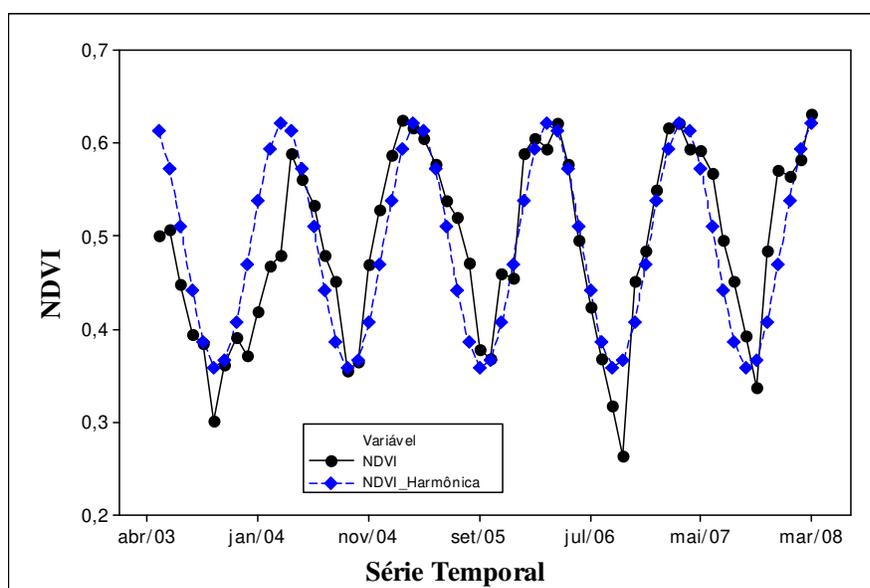


Figura 34. Curva de ajuste dos valores do NDVI (a) e porcentagem de informação (b), correspondente as imagens variância para cada harmônico, das safras 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 e 07/08.

#### 4.2.7 Análise estatística dos termos harmônicos: Amplitude, Variância e Termo Aditivo

A Figura 35 mostra os dados originais do perfil temporal do MVC/NDVI e a curva de ajuste do perfil obtida através da técnica de análise harmônica, para a série temporal desses valores nas cinco safras analisadas. Pode-se perceber que a resposta obtida a partir da metodologia empregada, é a que reproduz melhor a série temporal em estudo. Este ajuste bom ocorreu porque a forma do ciclo anual do parâmetro em questão é aproximadamente senoidal, com um ciclo completo executado nos 12 meses da série temporal de cada ano-safra. Além dessa característica a análise harmônica funciona como um filtro para eliminar pequenas variações nas composições MVC/NDVI derivadas de nuvens e ruídos.



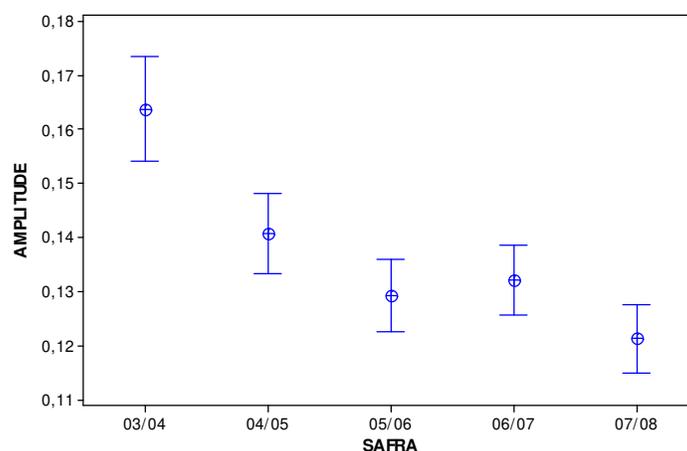
**Figura 35. Curva original e curva ajustada através da análise harmônica do perfil temporal da série MVC/NDVI, dos cinco anos-safra analisados.**

Pela análise de variância, Tabela 8, verificou-se diferença significativa ( $P < 0,05$ ) entre as safras apenas nas imagens amplitude. As diferenças entre as médias das safras para o termo aditivo e a imagem variância não foram significativas ( $P > 0,05$ ). A resposta da análise de variância está diretamente relacionada com a presença de ruídos nas imagens, que é mais sensível nas imagens amplitude que estão diretamente relacionadas com a variação máxima do NDVI para cada ano-safra ao longo da série temporal de imagens. Na safra 03/04, em média, esses valores foram mais altos do que nas demais safras, como pode ser observado na Figura 36 através do “interval plot”, obtido para os pixels mapeados com a cultura.

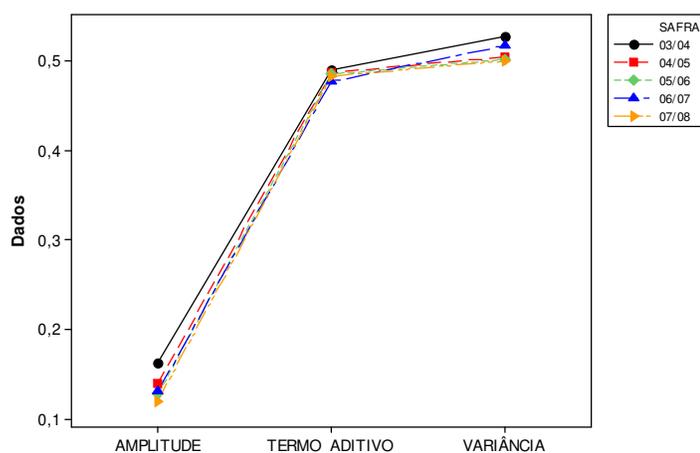
**Tabela 8. Média e desvio padrão dos termos harmônicos analisados, para os cinco anos-safras considerados no estudo.**

| Variáveis     | Safras      |             |             |             |             | P     | CV    |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|
|               | 03/04       | 04/05       | 05/06       | 06/07       | 07/08       |       |       |
| Amplitude     | 0,16 ± 0,08 | 0,14 ± 0,06 | 0,13 ± 0,05 | 0,13 ± 0,05 | 0,12 ± 0,05 | 0,001 | 45,37 |
| Termo aditivo | 0,49 ± 0,11 | 0,49 ± 0,11 | 0,48 ± 0,11 | 0,48 ± 0,11 | 0,48 ± 0,11 | 0,765 | 22,76 |
| Variância     | 0,53 ± 0,27 | 0,50 ± 0,26 | 0,50 ± 0,25 | 0,52 ± 0,23 | 0,50 ± 0,23 | 0,691 | 49,00 |

Nota-se que não há diferença significativa, nos valores de amplitude, para as demais safras (04/05, 05/06, 06/07 e 07/08). A magnitude dos valores do termo aditivo e variância também apresentaram valores elevados, para a safra 03/04, em relação às demais safras, como pode ser observado na Figura 37.



**Figura 36. “Interval Plot” da imagem amplitude para as diferentes safras analisadas, considerando os harmônicos de resposta da cana-de-açúcar.**



**Figura 37. Magnitude dos valores de amplitude, termo aditivo e variância, dos pixels com cana-de-açúcar, nas cinco safras consideradas.**

#### 4.2.8 Identificação das áreas com cana-de-açúcar a partir da resposta da análise harmônica na série temporal de imagens MVC/NDVI

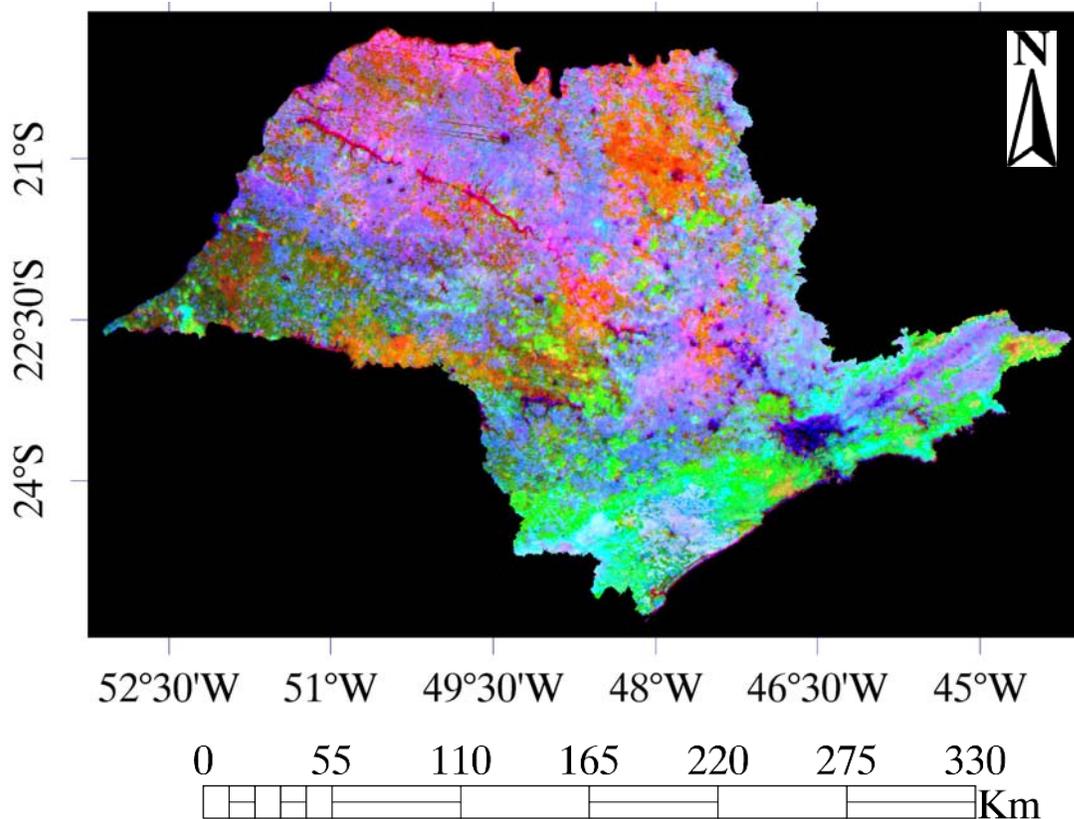
Esta etapa do trabalho está diretamente relacionada à obtenção de um mapa das áreas com cana-de-açúcar, para as diferentes safras, a partir dos resultados da análise harmônica. A base para identificação e/ou acompanhamento da evolução dessas áreas ao longo do tempo foram as composições coloridas *falsa-cor*/RGB, representando, respectivamente as imagens amplitude (R), termo aditivo (G) e fase (B), cujos harmônicos foram selecionados de acordo com a resposta da cultura, apresentado no *item 4.2*, em cada ano safra analisado. A Tabela 9 apresenta os termos harmônicos de resposta da cana-de-açúcar, utilizados na composição R (amplitude), G (termo aditivo) e B (fase).

**Tabela 9. Termos harmônicos de resposta da cultura para cada ano-safra utilizados na composição RGB.**

| <i>Safras</i> | <i>Termos harmônicos</i> |                          |                 |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
|               | <i>Amplitude (R)</i>     | <i>Termo Aditivo (G)</i> | <i>Fase (B)</i> |
| <i>03/04</i>  | 1º harmônico             | TA                       | 1º harmônico    |
| <i>04/05</i>  | 2º harmônico             | TA                       | 1º harmônico    |
| <i>05/06</i>  | 3º harmônico             | TA                       | 1º harmônico    |
| <i>06/07</i>  | 4º harmônico             | TA                       | 1º harmônico    |
| <i>07/08</i>  | 5º harmônico             | TA                       | 1º harmônico    |

As Figuras 38 a 42 apresentam as composições coloridas - RGB, geradas a partir da resposta da Tabela 9. Visualmente, áreas em tons de *magenta* apresentam potencial de pertencerem à classe cana-de-açúcar, quando comparados com o levantamento das áreas da cultura no estado realizados pelo projeto CANSAT/INPE.

- *Safra 03/04*



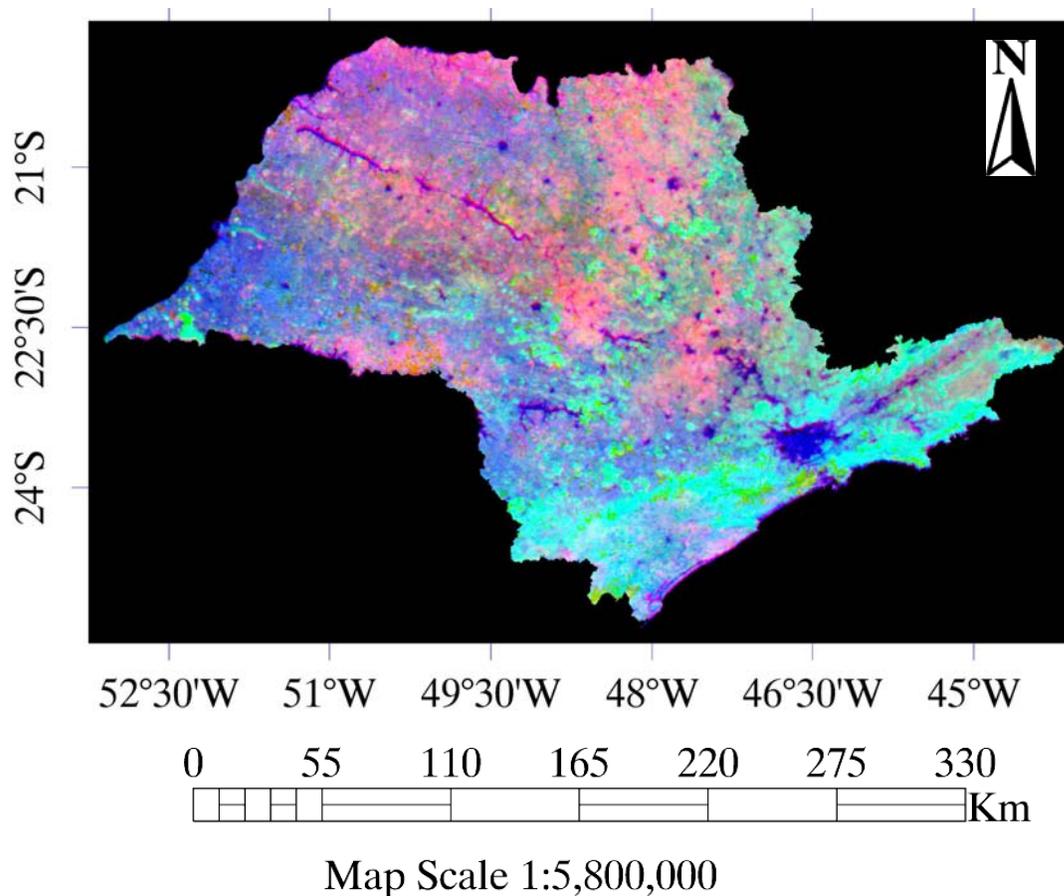
Map Scale 1:5,800,000

**Figura 38.** Composição RGB: R (amplitude - 1ºharmônico), G (termo aditivo) e B (fase - 1ºharmônico) para a safra 03/04 e estatística dos termos harmônicos, dos pixels tomados como referência.

**Tabela 10.** Parâmetros estatísticos dos pixels com cana-de-açúcar da imagem composição coloridos RGB – Safra 03/04.

| <i>Bandas</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Média</i> | <i>DP</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| <i>R</i>      | 0,03          | 0,30          | 0,17         | 0,04      |
| <i>G</i>      | 0,31          | 0,67          | 0,46         | 0,04      |
| <i>B</i>      | 0,00          | 1,00          | 0,46         | 0,49      |

- *Safra 04/05*

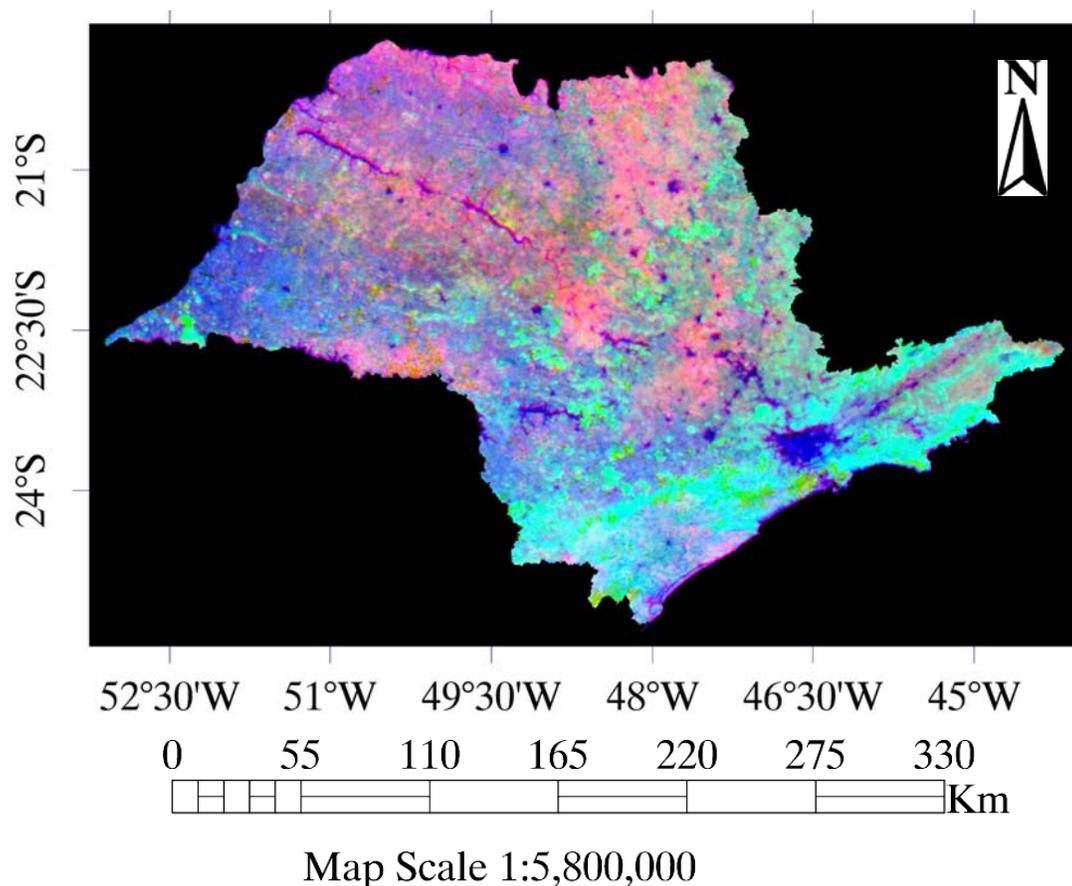


**Figura 39.** Composição RGB: R (amplitude - 2ºharmônico), G (termo aditivo) e B (fase - 1ºharmônico) para a safra 04/05 e estatística dos termos harmônicos, dos pixels tomados como referência.

**Tabela 11.** Parâmetros estatísticos dos pixels com cana-de-açúcar da imagem composição coloridos RGB – Safra 04/05.

| <i>Bandas</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Média</i> | <i>DP</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| <i>R</i>      | 0,04          | 0,25          | 0,14         | 0,03      |
| <i>G</i>      | 0,30          | 0,68          | 0,49         | 0,03      |
| <i>B</i>      | 0,00          | 1,00          | 0,78         | 0,16      |

- *Safra 05/06*

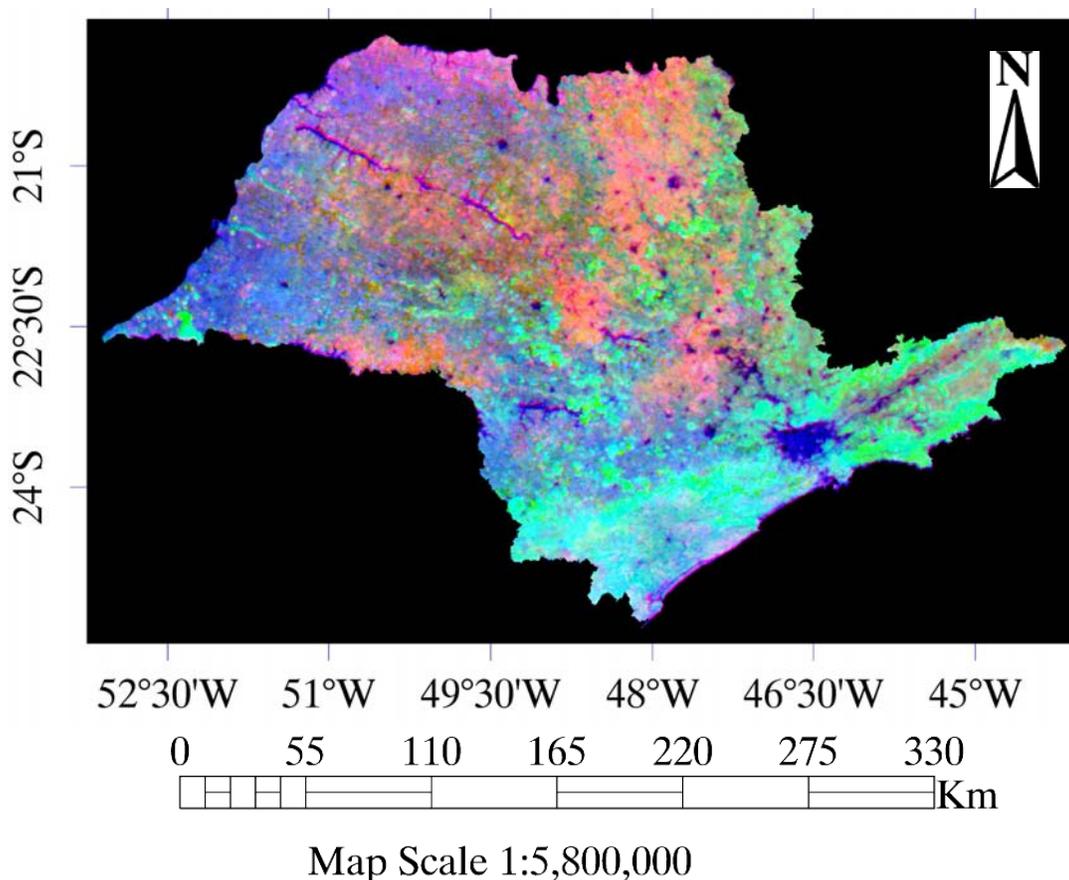


**Figura 40.** Composição RGB: R (amplitude - 3ºharmônico), G (termo aditivo) e B (fase - 1ºharmônico) para a safra 05/06 e estatística dos termos harmônicos, dos pixels tomados como referência.

**Tabela 12.** Parâmetros estatísticos dos pixels com cana-de-açúcar da imagem composição coloridos RGB – Safra 05/06.

| <i>Bandas</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Média</i> | <i>DP</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| <i>R</i>      | 0,04          | 0,22          | 0,13         | 0,03      |
| <i>G</i>      | 0,29          | 0,68          | 0,50         | 0,03      |
| <i>B</i>      | 0,00          | 1,00          | 0,68         | 0,11      |

▪ *Safra 06/07*

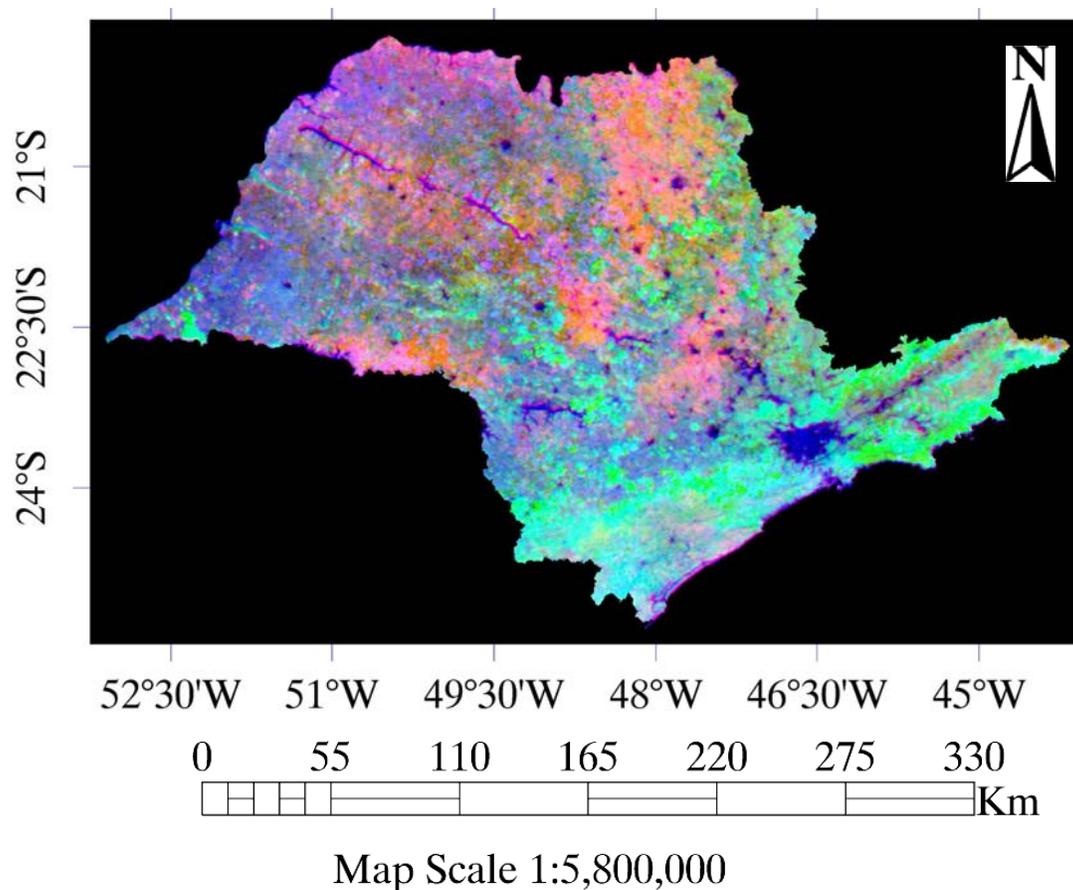


**Figura 41. Composição RGB: R (amplitude - 4ºharmônico), G (termo aditivo) e B (fase - 1ºharmônico) para a safra 06/07 e estatística dos termos harmônicos, dos pixels tomados como referência.**

**Tabela 13. Parâmetros estatísticos dos pixels com cana-de-açúcar da imagem composição coloridos RGB – Safra 06/07.**

| <i>Bandas</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Média</i> | <i>DP</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| <i>R</i>      | 0,04          | 0,22          | 0,14         | 0,03      |
| <i>G</i>      | 0,28          | 0,67          | 0,49         | 0,03      |
| <i>B</i>      | 0,00          | 1,00          | 0,54         | 0,11      |

- *Safra 07/08*



**Figura 42. Composição RGB: R (amplitude - 5º harmônico), G (termo aditivo) e B (fase) para a safra 07/08 e estatística dos termos harmônicos, dos pixels tomados como referência.**

**Tabela 14. Parâmetros estatísticos dos pixels com cana-de-açúcar da imagem composição coloridos RGB – Safra 07/08.**

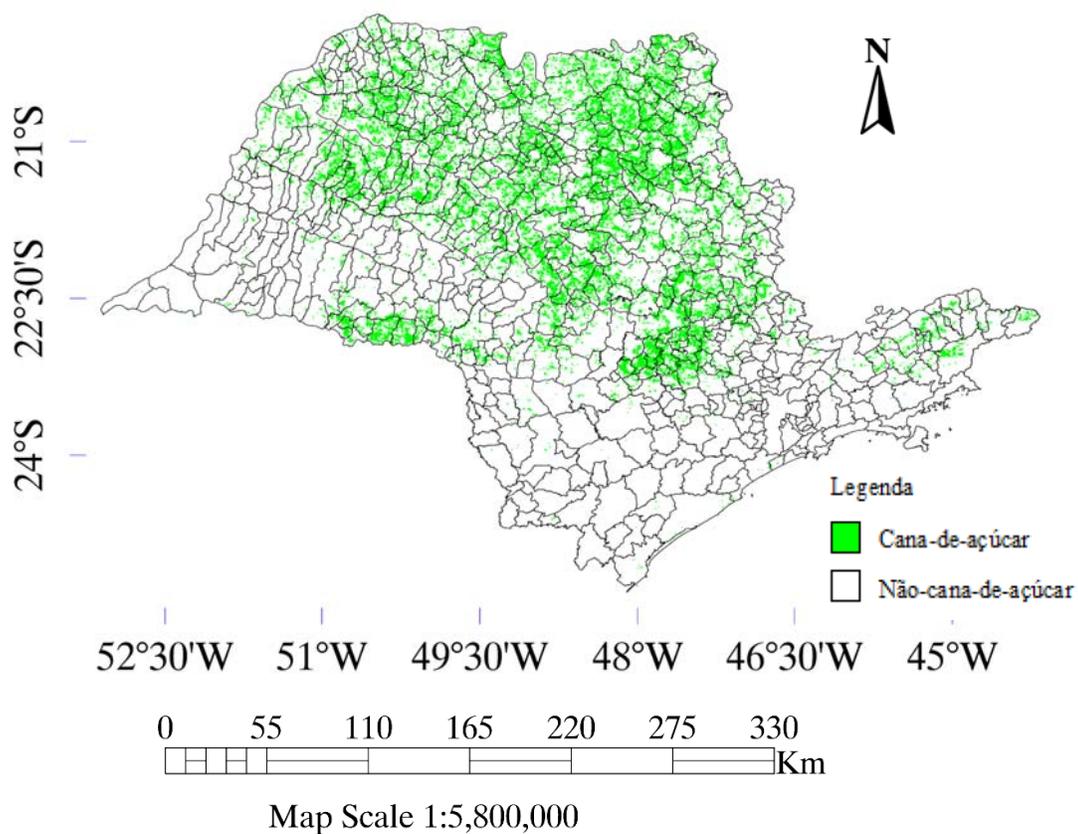
| <i>Bandas</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Média</i> | <i>DP</i> |
|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------|
| <i>R</i>      | 0,03          | 0,21          | 0,13         | 0,03      |
| <i>G</i>      | 0,29          | 0,68          | 0,50         | 0,03      |
| <i>B</i>      | 0,00          | 1,00          | 0,52         | 0,22      |

#### 4.2.9 Classificação supervisionada das imagens composição RGB

##### 4.2.9.1 Classificação supervisionada: algoritmo MAXVER

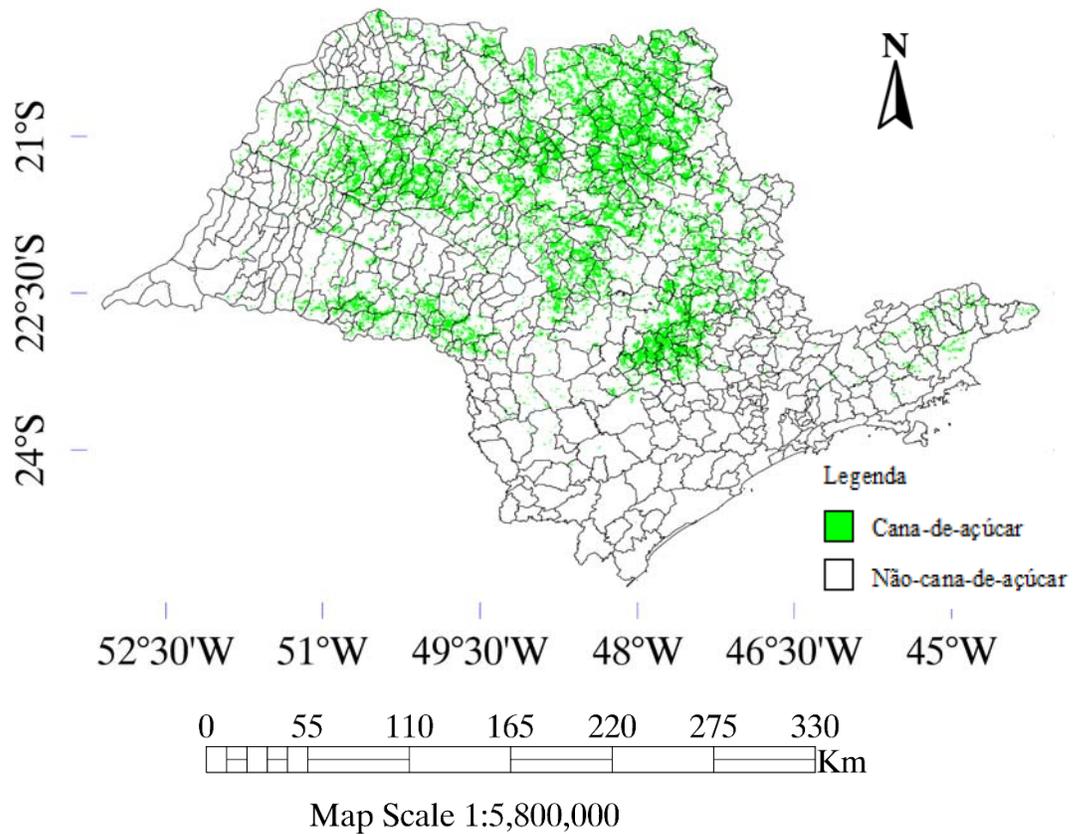
As Figuras 43 a 47 apresentam o resultado da classificação supervisionada, baseada na utilização do algoritmo de Máxima Verossimilhança (MAXVER) nas composições RGB derivadas do resultado da análise harmônica.

- Safra 03/04



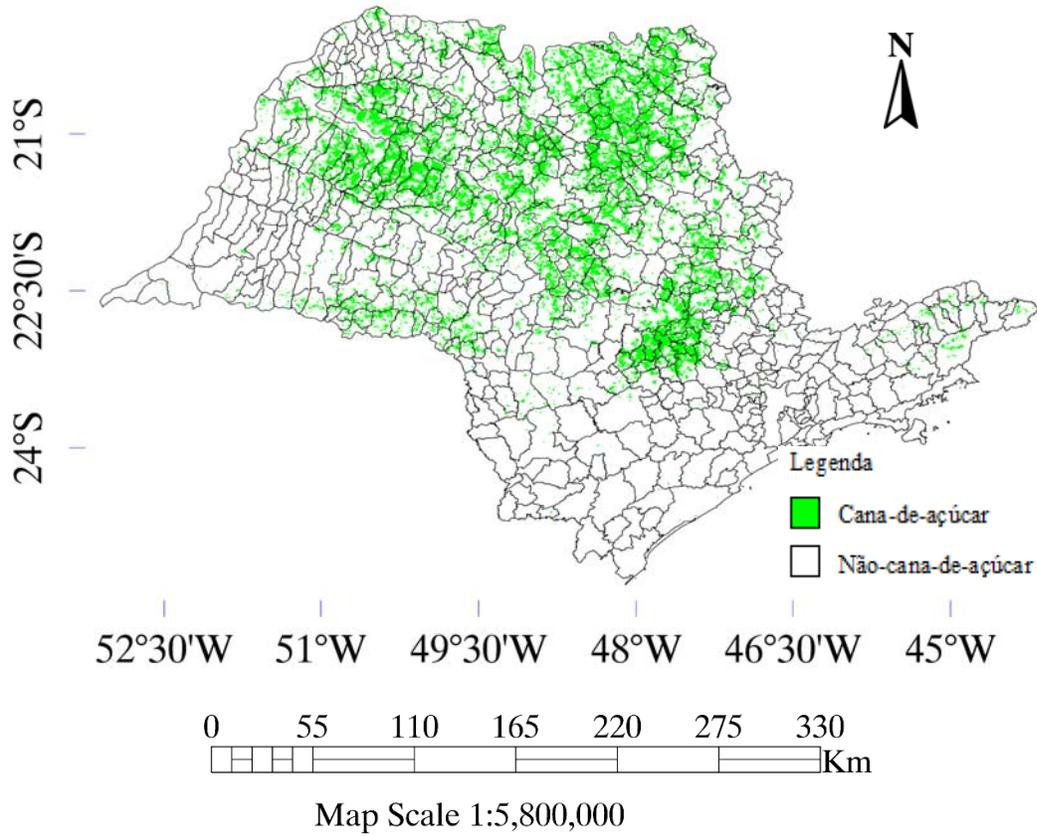
**Figura 43. Classificação supervisionada dos pixels com cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Safra 03/04.**

- Safra 04/05



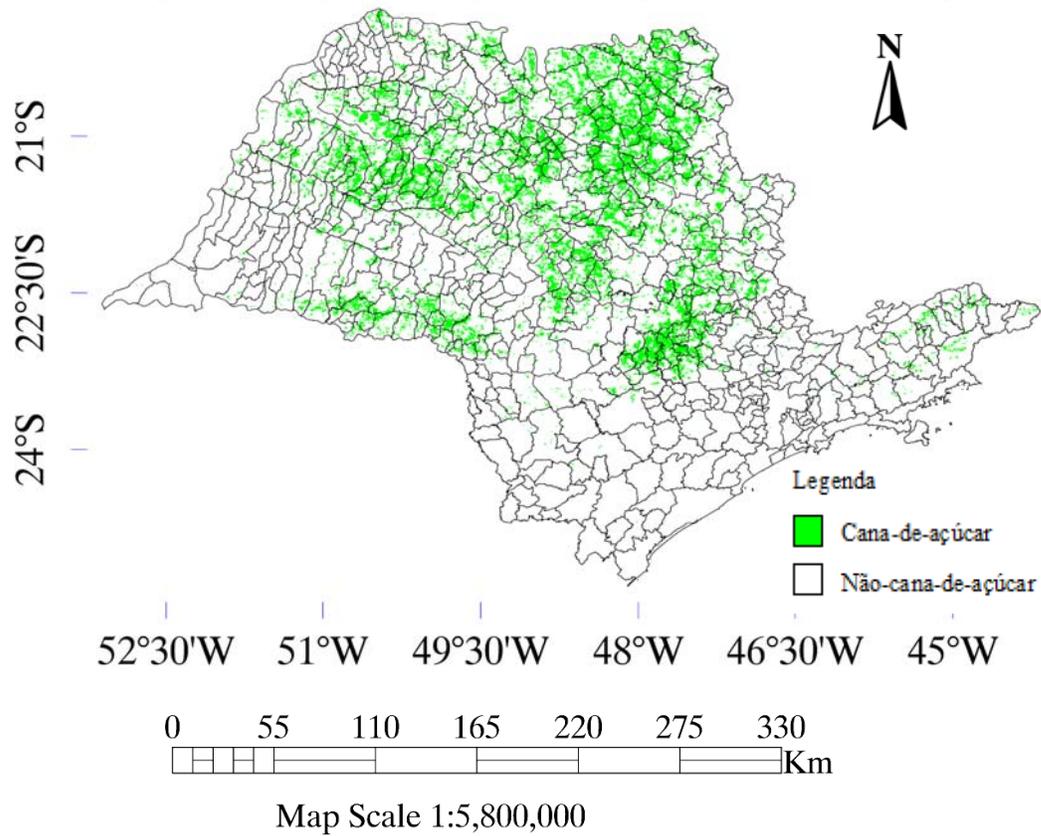
**Figura 44. Classificação supervisionada dos pixels com cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Safra 04/05.**

- Safra 05/06



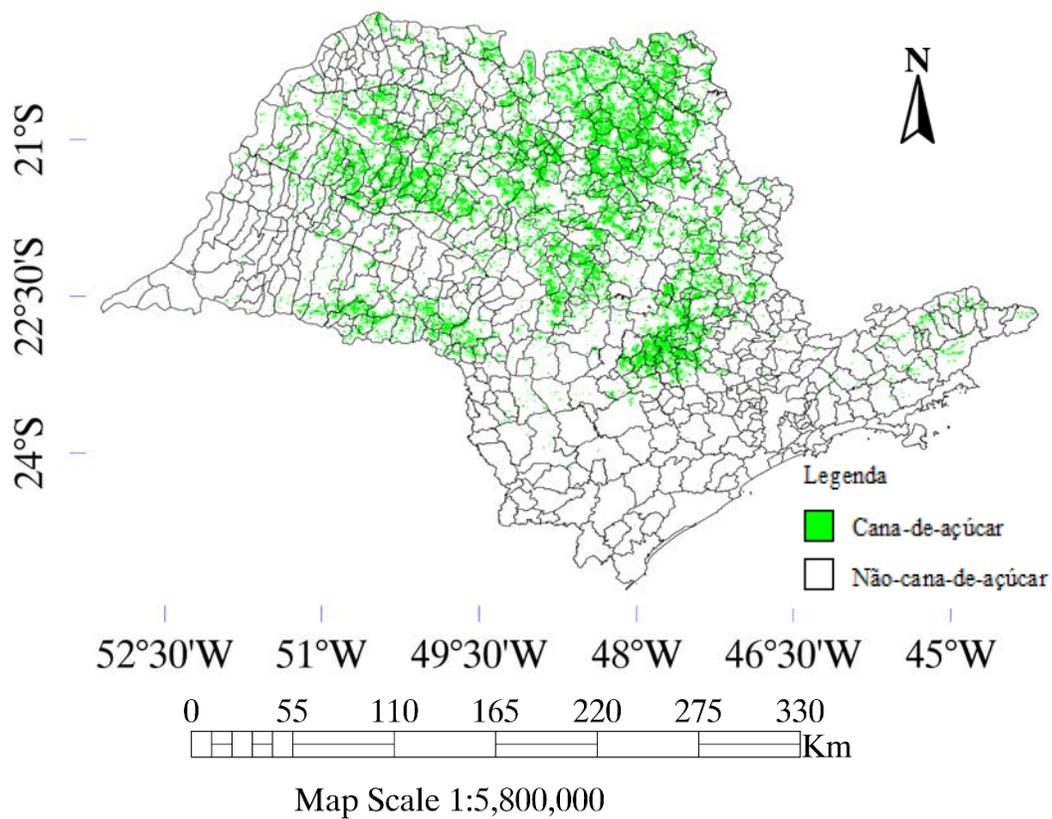
**Figura 45. Classificação supervisionada dos pixels com cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Safra 05/06.**

- Safra 06/07



**Figura 46. Classificação supervisionada dos pixels com cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Safra 06/07.**

- Safra 07/08



**Figura 47. Classificação supervisionada dos pixels com cana-de-açúcar no estado de São Paulo: Safra 07/08.**

#### 4.2.9.2 Estimativa de área de referência por meio de Matriz de erro e Expansão direta

A partir da classificação supervisionada, foi calculada a área com cana-de-açúcar dos municípios através da metodologia baseado na matriz de erro (ME) e expansão direta (ED), tomando-se, como referência, os pixels mapeados com a cultura, nas diferentes safras. As Tabelas 15 a 19 apresentam os resultados obtidos, comparados com a estimativa oficial considerada (CANASAT/INPE) através do cálculo do erro relativo (expresso em porcentagem (%)).

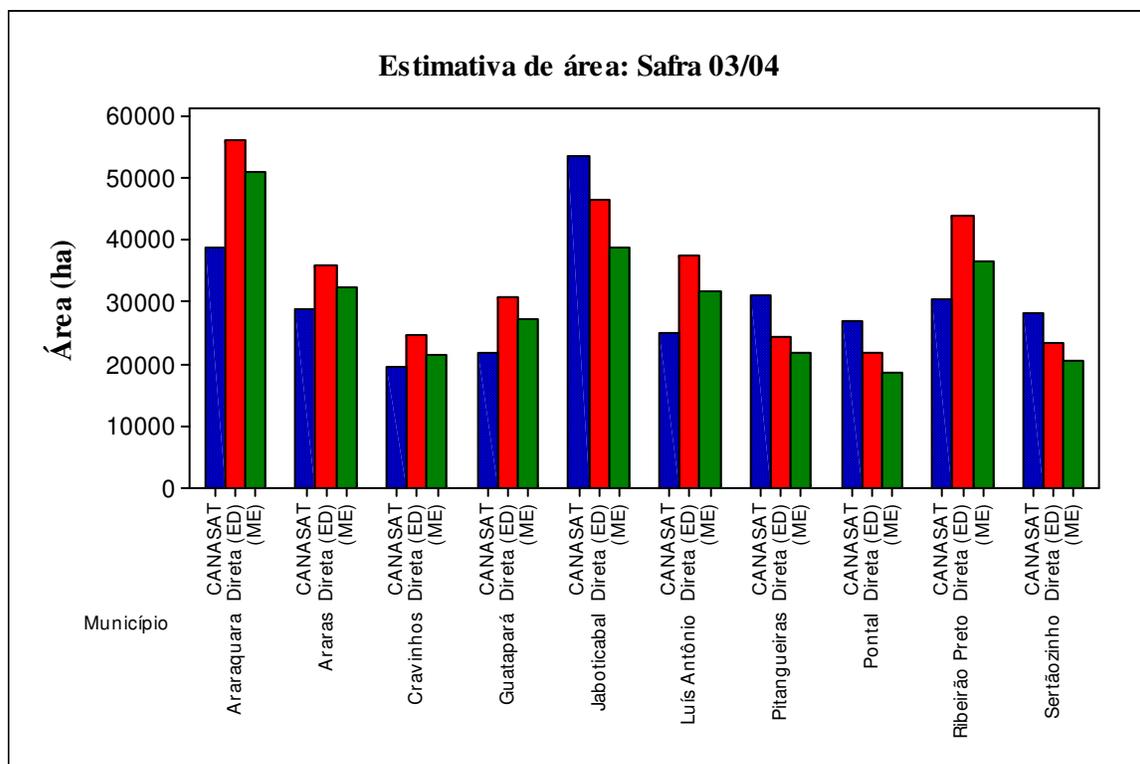
- **Safra 03/04**

A média do índice kappa, para a classificação da composição RGB do ano-safra 03/04 foi de 0,4, considerada razoável, segundo terminologia proposta por LANDIS e KOCH (1977). A concordância entre os pixels com cana e não cana, em relação à referência, foi afetada em função da qualidade das composições MVC/NDVI utilizadas na decomposição da série temporal baseada na aplicação do algoritmo da análise harmônica. Pode-se observar que a estimativa de área realizada através da ME e por ED, para a maioria dos municípios, foi superestimada em relação à estimativa oficial considerada, apresentada na Tabela 15.

**Tabela 15. Comparação entre as estimativas de área, em hectares, de cana-de-açúcar para a safra 03/04.**

| <i>Município</i>      | <i>Área<br/>CANASAT<br/>(ha)</i> | <i>Área<br/>Expansão<br/>Direta<br/>(ED)</i> | <i>Área<br/>Matriz de<br/>Erro<br/>(ME)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ED)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ME)</i> | <i>Índice<br/>Kappa</i> |
|-----------------------|----------------------------------|--|---|--|--|-------------------------|
| <i>Araraquara</i>     | 38.951,00                        | 56.336,00                                    | 51.024,32                                   | -44,63                                     | -30,99                                     | 0,44                    |
| <i>Araras</i>         | 28.860,00                        | 36.008,00                                    | 32.612,96                                   | -24,76                                     | -13,00                                     | 0,44                    |
| <i>Cravinhos</i>      | 19.542,00                        | 24.880,00                                    | 21.459,00                                   | -27,31                                     | -9,80                                      | 0,35                    |
| <i>Guatapar</i>      | 21.872,00                        | 30.975,00                                    | 27.258,00                                   | -41,61                                     | -24,62                                     | 0,39                    |
| <i>Jaboticabal</i>    | 53.749,00                        | 46.662,00                                    | 38.969,84                                   | 13,18                                      | 27,49                                      | 0,34                    |
| <i>Lus Antnio</i>   | 25.243,00                        | 37.674,00                                    | 31.921,24                                   | -49,24                                     | -26,45                                     | 0,37                    |
| <i>Pitangueiras</i>   | 31.124,00                        | 24.510,00                                    | 21.921,40                                   | 21,25                                      | 29,56                                      | 0,43                    |
| <i>Pontal</i>         | 27.072,00                        | 22.010,00                                    | 18.772,40                                   | 18,69                                      | 30,65                                      | 0,38                    |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 30.576,00                        | 44.200,00                                    | 36.712,00                                   | -44,55                                     | -20,06                                     | 0,32                    |
| <i>Sertãozinho</i>    | 28.226,00                        | 23.374,00                                    | 20.665,84                                   | 17,18                                      | 26,78                                      | 0,42                    |

Os maiores erros absolutos foram encontrados nos municípios de Luís Antônio, Araraquara e Ribeirão Preto. Apenas para os municípios Jaboticabal, Pitangueiras, Pontal e Sertãozinho, as metodologias empregadas subestimaram os valores obtidos em relação à estimativa oficial, com erros variando de 13,18% a 30,65%. A Figura 48 apresenta detalhadamente a magnitude dos valores obtidos através da EDT e MET, comparados com o dado oficial.

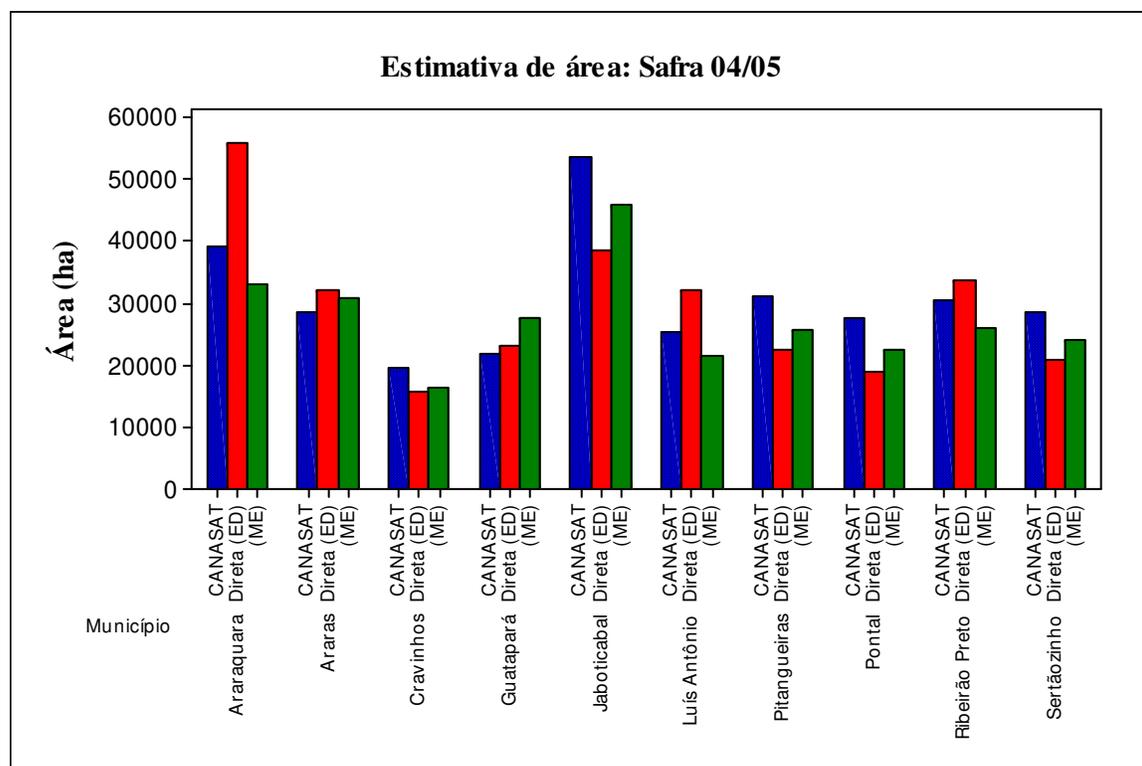


**Figura 48. Comparo entre as estimativas da área ocupada com cana-de-ao nos municípios estudados, safra 03/04.**

- *Safra 04/05*

Os erros relativos (%) apresentados na Tabela 16, para a safra 04/05, ainda são considerados insatisfatórios, quando comparados com a estimativa de área oficial. Entretanto,  possível perceber, através da Figura 49, que ao contrário da safra anterior, onde para grande parte dos municípios os valores de área obtidos foram superestimados nas estimativas por ER e ME, para o ano-safra em questão há uma tendência dos municípios apresentarem uma resposta distinta em relao às metodologias empregadas. Pode-se observar que o cálculo de

área obtido através da ED tende a superestimar os valores obtidos, enquanto que pela ME os valores são subestimados, embora estejam mais próximos dos dados considerados referência.



**Figura 49. Comparação entre as estimativas da área ocupada com cana-de-açúcar nos municípios estudados, safra 04/05.**

O maior e menor erros absolutos foram encontrados, respectivamente nos municípios de Araraquara (43,25%) e Guataporá (5,19%), quando a área de cana-de-açúcar foi estimada através da expansão direta (ED). Para a matriz de erro (ME), destaca-se o município de Araras com erro absoluto de 7,27%.

**Tabela 16. Comparação entre as estimativas de área, em hectares, de cana-de-açúcar para a safra 04/05.**

| <i>Município</i>      | <i>Área<br/>CANASAT</i> | <i>Área<br/>Expansão<br/>Direta<br/>(ED)</i> | <i>Área<br/>Matriz de<br/>Erro<br/>(ME)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ED)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ME)</i> | <i>Índice<br/>Kappa</i> |
|-----------------------|-------------------------|--|---|--|--|-------------------------|
| <i>Araraquara</i>     | 39.172,00               | 56.115,00                                    | 33.198,00                                   | -43,25                                     | 15,25                                      | 0,55                    |
| <i>Araras</i>         | 28.771,00               | 32.201,00                                    | 30.864,00                                   | -11,92                                     | -7,27                                      | 0,52                    |
| <i>Cravinhos</i>      | 19.650,00               | 15.606,00                                    | 16.483,00                                   | 20,58                                      | 16,11                                      | 0,47                    |
| <i>Guatapar</i>      | 21.899,00               | 23.037,00                                    | 27.671,00                                   | -5,19                                      | -26,35                                     | 0,33                    |
| <i>Jaboticabal</i>    | 53.871,00               | 38.532,00                                    | 45.955,00                                   | 28,47                                      | 14,69                                      | 0,35                    |
| <i>Lus Antnio</i>   | 25.433,00               | 32.244,00                                    | 21.528,00                                   | -26,78                                     | 15,35                                      | 0,64                    |
| <i>Pitangueiras</i>   | 31.336,00               | 22.360,00                                    | 25.800,00                                   | 28,64                                      | 17,66                                      | 0,40                    |
| <i>Pontal</i>         | 27.759,00               | 18.950,00                                    | 22.365,00                                   | 31,73                                      | 19,43                                      | 0,37                    |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 30.500,00               | 33.800,00                                    | 26.000,00                                   | -10,81                                     | 14,75                                      | 0,60                    |
| <i>Sertãozinho</i>    | 28.541,00               | 20.956,00                                    | 24.180,00                                   | 26,57                                      | 15,27                                      | 0,40                    |

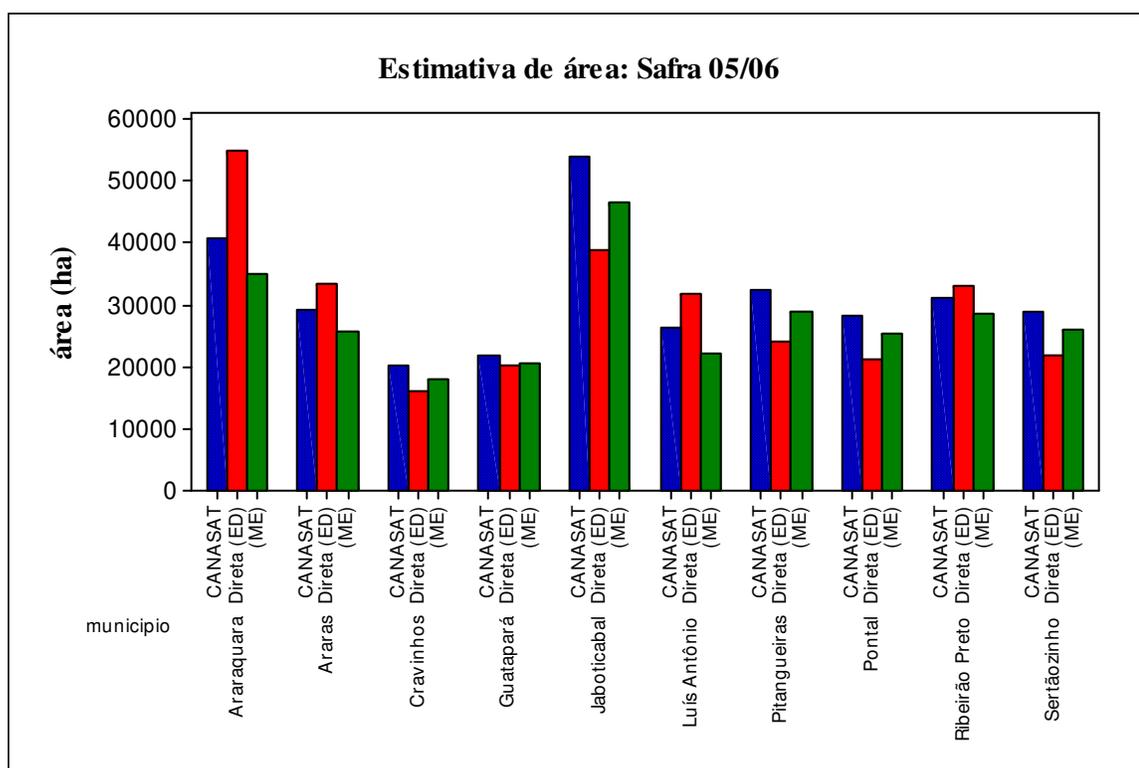
- **Safra 05/06**

Na safra 05/06, os resultados alcançados com a ME estão mais proximos da referência, segundo a Tabela 17. Os resultados obtidos, a partir da terceira safra analisada, indicam que  medida que o número de imagens da série temporal aumenta há uma resposta diretamente proporcional na melhoria dos resultados da classificação. A média do ndice kappa foi de 0,58, caracterizando uma boa identificação dos pixels com a cultura nos municípios estudados.

**Tabela 17. Comparo entre as estimativas de área, em hectares, de cana-de-aucar para a safra 05/06.**

| <i>Município</i>      | <i>rea<br/>CANASAT</i> | <i>rea<br/>Expansão<br/>Direta<br/>(ED)</i> | <i>rea<br/>Matriz de<br/>Erro<br/>(ME)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ED)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ME)</i> | <i>ndice<br/>Kappa</i> |
|-----------------------|-------------------------|--|---|--|--|-------------------------|
| <i>Araraquara</i>     | 40.845,00               | 54.827,00                                    | 35.210,00                                   | -34,23                                     | 13,79                                      | 0,65                    |
| <i>Araras</i>         | 29.316,00               | 33.436,00                                    | 25.720,00                                   | -14,05                                     | 12,26                                      | 0,60                    |
| <i>Cravinhos</i>      | 20.167,00               | 15.948,08                                    | 18.038,00                                   | 20,91                                      | 10,55                                      | 0,42                    |
| <i>Guatapar</i>      | 22.018,00               | 20.237,00                                    | 20.658,26                                   | 8,08                                       | 6,17                                       | 0,58                    |
| <i>Jaboticabal</i>    | 54.012,00               | 38.969,84                                    | 46.662,00                                   | 27,84                                      | 13,60                                      | 0,66                    |
| <i>Lus Antnio</i>   | 26.341,00               | 31.921,24                                    | 22.126,00                                   | -21,18                                     | 16,00                                      | 0,63                    |
| <i>Pitangueiras</i>   | 32.340,00               | 23.985,40                                    | 28.810,00                                   | 25,83                                      | 10,91                                      | 0,57                    |
| <i>Pontal</i>         | 28.390,00               | 21.186,40                                    | 25.560,00                                   | 25,37                                      | 9,96                                       | 0,55                    |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 31.098,00               | 32.968,00                                    | 28.600,00                                   | -6,01                                      | 8,03                                       | 0,65                    |
| <i>Sertãozinho</i>    | 28.826,00               | 21.963,50                                    | 26.195,00                                   | 23,80                                      | 9,12                                       | 0,58                    |

Apenas na área obtida a partir da ED, foram encontrados valores superestimados, especialmente nos municípios de Araraquara, Araras, Luís Antônio e Ribeirão Preto, onde o maior erro absoluto foi em Araraquara (34,23%). A Figura 50 apresenta a distribuição das estimativas calculadas, em que os melhores resultados, foram encontrados nos municípios de Guataporá, Pontal, Ribeirão Preto e Sertãozinho, onde os erros relativos (foram inferiores a 10%), considerados baixos. É importante ressaltar que a melhor estimativa, foi obtida a partir da ME.



**Figura 50. Comparação entre as estimativas da área ocupada com cana-de-açúcar nos municípios estudados, safra 05/06.**

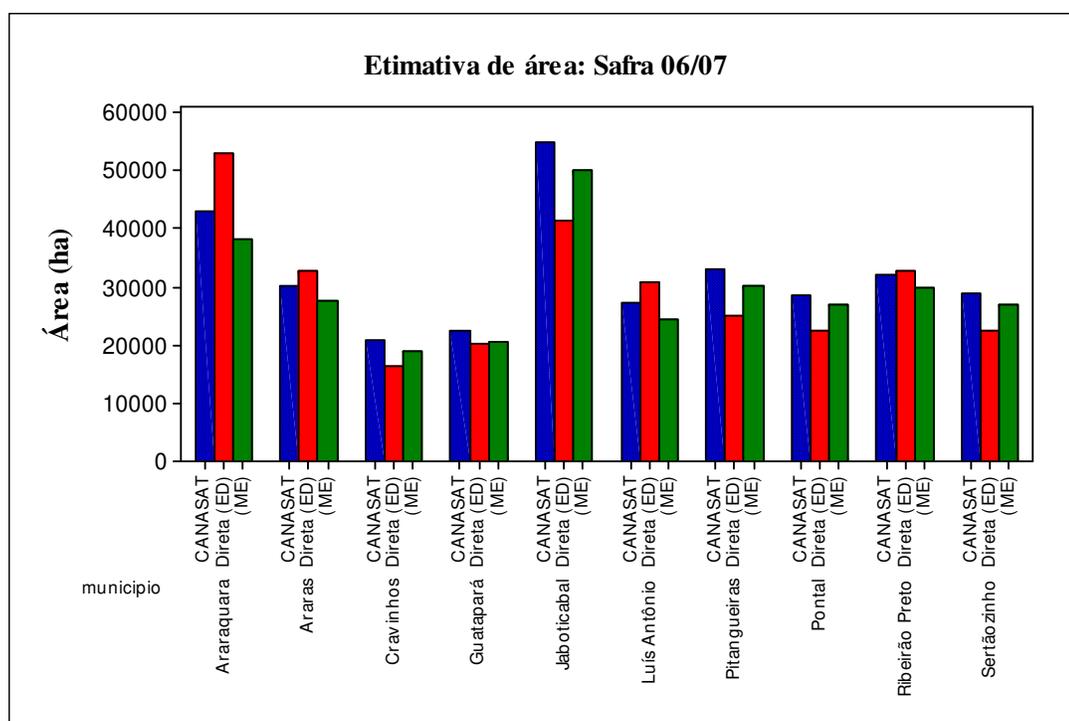
- **Safra 06/07**

Ao analisar a estimativa de área, realizada para a safra 06/07 (Tabela 18), pode-se observar que os erros relativos (%) obtidos a partir do método de estimativa de área por meio da ME foram inferiores a 10%, exceto para o município de Araraquara (11,24%). Assim como na safra anterior, os municípios de Pontal, Ribeirão Preto e Sertãozinho apresentaram os menores erros, variando entre 6% e 7%, baseado na ME. A resposta em relação à estimativa

realizada a partir da ED indica a mesma tendência da safra anterior, ou seja, para os municípios de Araraquara, Araras, Luís Antônio e Ribeirão Preto a área é superestimada, onde o maior erro absoluto foi encontrado em Araraquara (23%). Entretanto, destaca-se o município de Guataporá com erro inferior a 10%, nas duas estimativas.

**Tabela 18. Comparação entre as estimativas de área, em hectares, de cana-de-açúcar para a safra 06/07.**

| <i>Município</i>      | <i>Área<br/>CANASAT</i> | <i>Área<br/>Expansão<br/>Direta<br/>(ED)</i> | <i>Área<br/>Matriz de<br/>Erro<br/>(ME)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ED)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ME)</i> | <i>Índice<br/>Kappa</i> |
|-----------------------|-------------------------|--|---|--|--|-------------------------|
| <i>Araraquara</i>     | 43.072,00               | 53.197,28                                    | 38.228,00                                   | -23,50                                     | 11,24                                      | 0,62                    |
| <i>Araras</i>         | 30.354,00               | 32.780,14                                    | 27.649,00                                   | -7,99                                      | 8,91                                       | 0,67                    |
| <i>Cravinhos</i>      | 20.836,00               | 16.302,62                                    | 18.971,00                                   | 21,75                                      | 8,95                                       | 0,59                    |
| <i>Guataporá</i>      | 22.382,00               | 20.237,00                                    | 20.658,26                                   | 9,58                                       | 7,70                                       | 0,51                    |
| <i>Jaboticabal</i>    | 54.867,00               | 41.585,74                                    | 50.197,00                                   | 24,20                                      | 8,51                                       | 0,59                    |
| <i>Luís Antônio</i>   | 27.258,00               | 30.868,76                                    | 24.518,00                                   | -13,24                                     | 10,05                                      | 0,59                    |
| <i>Pitangueiras</i>   | 32.978,00               | 24.940,00                                    | 30.100,00                                   | 24,37                                      | 8,72                                       | 0,60                    |
| <i>Pontal</i>         | 28.712,00               | 22.549,60                                    | 26.980,00                                   | 21,46                                      | 6,03                                       | 0,57                    |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 32.001,00               | 32.708,00                                    | 29.900,00                                   | -2,20                                      | 6,56                                       | 0,62                    |
| <i>Sertãozinho</i>    | 29.086,00               | 22.479,34                                    | 27.001,00                                   | 22,71                                      | 7,16                                       | 0,59                    |



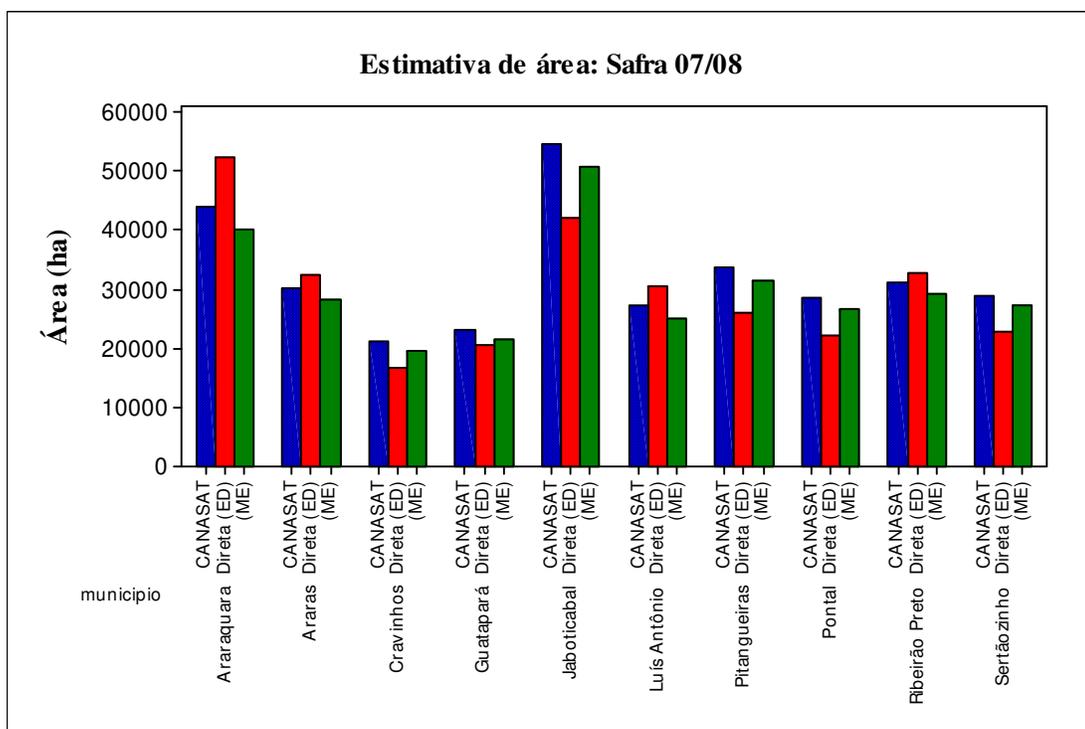
**Figura 51. Comparação entre as estimativas da área ocupada com cana-de-açúcar nos municípios estudados, safra 06/07.**

A área obtida por meio da ME, se comporta de maneira mais similar, à referência do que os obtidos a partir da ED. Este comportamento é observado para todos os municípios analisados.

- *Safra 07/08*

**Tabela 19. Comparação entre as estimativas de área, em hectares, de cana-de-açúcar para a safra 07/08.**

| <i>Município</i>      | <i>Área<br/>CANASAT</i> | <i>Área<br/>Expansão<br/>Direta<br/>(ED)</i> | <i>Área<br/>Matriz de<br/>Erro<br/>(ME)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ED)</i> | <i>Erro (%)<br/>(CANASAT<br/>X<br/>ME)</i> | <i>Índice<br/>Kappa</i> |
|-----------------------|-------------------------|--|---|--|--|-------------------------|
| <i>Araraquara</i>     | 44.021,00               | 52.312,00                                    | 40.240,00                                   | -18,83                                     | 8,58                                       | 0,65                    |
| <i>Araras</i>         | 30.254,00               | 32.612,96                                    | 28.292,00                                   | -7,79                                      | 6,48                                       | 0,64                    |
| <i>Cravinhos</i>      | 21.078,00               | 16.601,18                                    | 19.593,00                                   | 21,23                                      | 7,04                                       | 0,59                    |
| <i>Guataporá</i>      | 23.118,00               | 20.683,04                                    | 21.476,00                                   | 10,53                                      | 7,10                                       | 0,57                    |
| <i>Jaboticabal</i>    | 54.800,00               | 42.193,76                                    | 50.904,00                                   | 23,00                                      | 7,10                                       | 0,60                    |
| <i>Luís Antônio</i>   | 27.392,00               | 30.665,44                                    | 25.116,00                                   | -11,95                                     | 8,30                                       | 0,59                    |
| <i>Pitangueiras</i>   | 33.638,00               | 26.049,40                                    | 31.390,00                                   | 22,55                                      | 6,68                                       | 0,60                    |
| <i>Pontal</i>         | 28.544,00               | 22.187,50                                    | 26.625,00                                   | 22,26                                      | 6,72                                       | 0,58                    |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 31.266,00               | 32.825,00                                    | 29.250,00                                   | -4,98                                      | 6,44                                       | 0,62                    |
| <i>Sertãozinho</i>    | 29.080,00               | 22.761,44                                    | 27.404,00                                   | 21,72                                      | 5,76                                       | 0,60                    |



**Figura 52. Comparação entre as estimativas da área ocupada com cana-de-açúcar nos municípios estudados, safra 07/08.**

De maneira geral, para a última safra analisada, os municípios de Pitangueiras, Pontal, Ribeirão Preto e Sertãozinho foram os que apresentaram os melhores resultados, na estimativa da área de cana-de-açúcar, quando considerada a determinação desse parâmetro a partir da ME. Embora os erros sejam superiores a 5%, vale ressaltar que as estimativas obtidas basearam-se em métodos totalmente objetivos, utilizando imagens AVHRR/NOAA com pixel de 1,1 x 1,1km, ao contrário das estimativas de área de cana, tomada como referência, que embora sejam também objetivas, são realizadas tomando-se como base para os mapeamentos imagens LANDSAT com pixel de 30 x 30m. A classificação, assim como nas safras anteriores, com exceção da safra 03/04, foi considerada boa, indicando que a análise harmônica é uma metodologia viável, na identificação da cultura em questão, mesmo utilizando algoritmos mais simples de classificação supervisionada.

Apesar da expansão direta também levar em consideração o resultado da classificação, este método não apresentou resultados que fossem coerentes (em relação aos erros obtidos), para serem utilizados em um sistema de suporte à previsão de safra, de acordo com a metodologia proposta no estudo, com exceção do município Guatapar, que nas safras 05/06, 06/07 e 07/08, apresentou o erro relativo de 10% entre a estimativa oficial e as metodologias empregadas. Pelo teste t-student (Tabela 20), não houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre a área de cana-de-açucar tomada como referência, em relação às estimativas obtidas através da expansão direta e matriz de erro para nenhuma safra, considerando-se a média da área (em hectares), dos municípios.

**Tabela 20. Comparo de média entre as estimativas de área, em hectares, de todos os municípios analisados.**

|                | <i>SAFRAS</i> |              |              |              |              |
|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                | <i>03/04</i>  | <i>04/05</i> | <i>05/06</i> | <i>06/07</i> | <i>07/08</i> |
| <i>CANASAT</i> | 30.078        | 30.247       | 30.835       | 31.580       | 31.073       |
| <i>ED</i>      | 33.522        | 27.948       | 28.236       | 28.616       | 28.711       |
| <i>P-VALOR</i> | 0,29          | 0,48         | 0,41         | 0,35         | 0,34         |
| <i>CANASAT</i> | 30.078        | 30.247       | 30.835       | 31.580       | 31.073       |
| <i>ME</i>      | 29.032        | 26.945       | 27.334       | 29.078       | 29.561       |
| <i>P-VALOR</i> | 0,73          | 0,27         | 0,23         | 0,42         | 0,48         |

\*teste t-Student a 5% de significância.

Na Tabela 21, estão representados os valores da correlação de Pearson ( $r$ ) entre o CANASAT e as estimativas de área por expansão direta e matriz de erro, para os municípios

analisados em cada ano-safra. Nota-se que a safra 03/04 apresenta os menores valores de correlação, para as duas metodologias utilizadas na determinação das áreas com a cultura. Esta resposta está diretamente relacionada com a baixa qualidade das imagens utilizadas na composição colorida RGB, devido, principalmente, à presença de pixels contaminados por nuvens e ruídos nas composições MVC/NDVI.

Como o *p-value* foi menor que 0,05 para todos os resultados das comparações, a associação entre as estimativas foi considerada estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95%. Isso indica que as estimativas são fortemente correlacionadas e possuem a mesma tendência, movendo-se em perfeita proporção na mesma direção.

**Tabela 21. Correlação de Pearson (r) entre a estimativa de área oficial com cana-de-açúcar e a área obtida por expansão direta (ED) e Matriz de erro (ME) para os municípios estudados.**

| <i>Safra</i> |                | <i>ED</i> | <i>ME</i> |
|--------------|----------------|-----------|-----------|
| <i>03/04</i> | <b>CANASAT</b> | 0,62      | 0,59      |
| <i>04/05</i> |                | 0,67      | 0,94      |
| <i>05/06</i> |                | 0,70      | 0,99      |
| <i>06/07</i> |                | 0,81      | 0,99      |
| <i>07/08</i> |                | 0,82      | 0,99      |

\*teste t-Student a 5% de significância.

Observa-se que a correlação aumentou a cada safra, indicando a importância da análise de séries temporais, devido ao aumento gradativo das imagens ao longo dos diferentes anos-safras. O aumento das imagens na série está diretamente relacionado com a melhoria da qualidade final dos harmônicos gerados, uma vez que a função primordial da análise harmônica é a decomposição da série. É importante destacar a sensibilidade da classificação ao aumento das áreas ocupadas pela cultura em todos os municípios analisados.

### 4.3 Terceira Etapa: Avaliação/aplicação do modelo fenológico-espectral na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

A partir das áreas mapeadas com a cultura nas várias safras foi extraído o perfil médio temporal do NDVI para cada município, parâmetro espectral de entrada para obtenção da produtividade, a partir do modelo fenológico-espectral. As Figuras 53 a 57 apresentam o perfil temporal dos valores médios do NDVI, obtido para os dez municípios analisados, nas cinco safras, considerando-se apenas os pixels com cana-de-açúcar.

#### 4.3.1 Perfil temporal do NDVI para os municípios selecionados ao longo das diferentes safras utilizadas

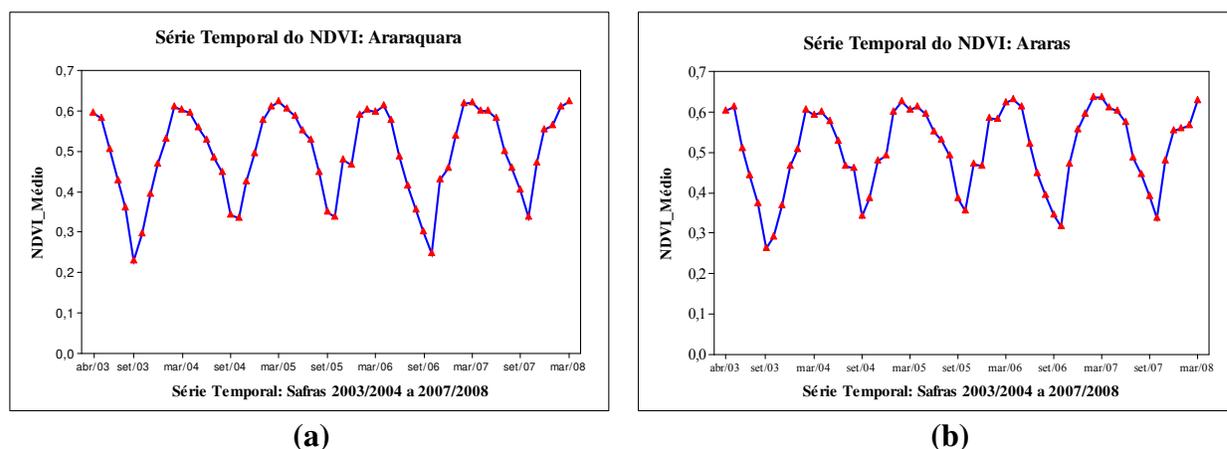


Figura 53. Perfil temporal dos valores médios do NDVI, nas cinco safras, para os municípios de Araraquara (a) e Araras (b).

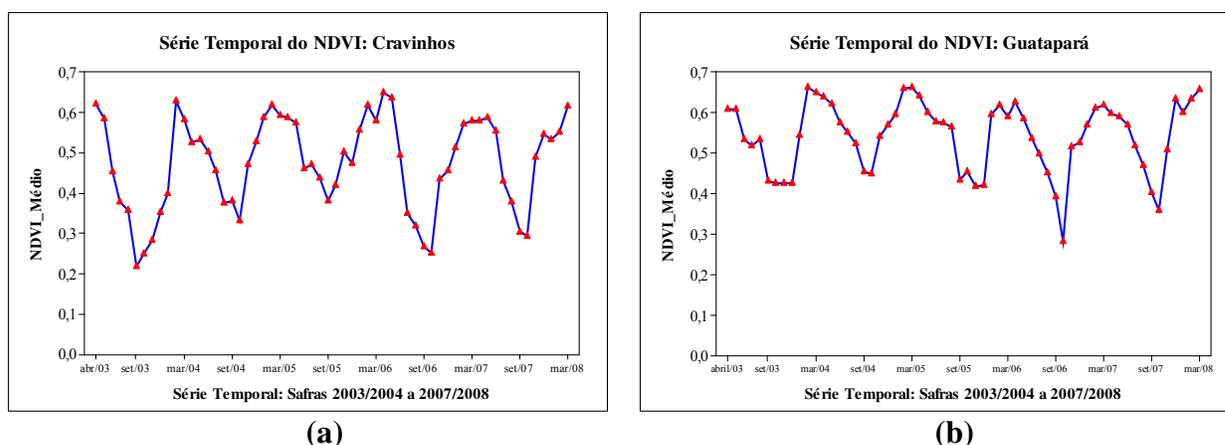
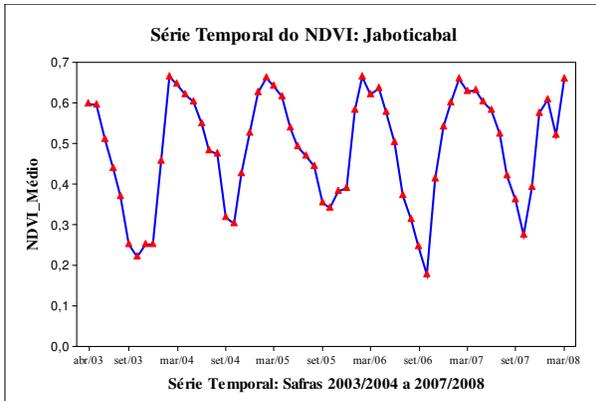
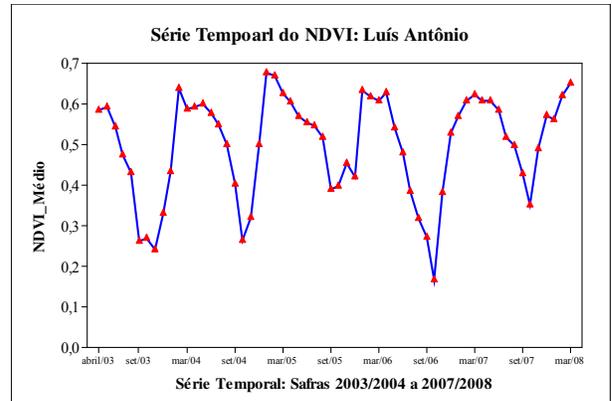


Figura 54. Perfil temporal dos valores médios do NDVI, nas cinco safras, para os municípios de Cravinhos (a) e Guatapar (b).

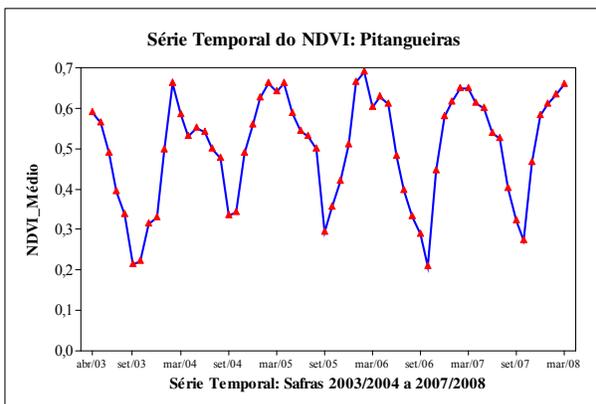


(a)

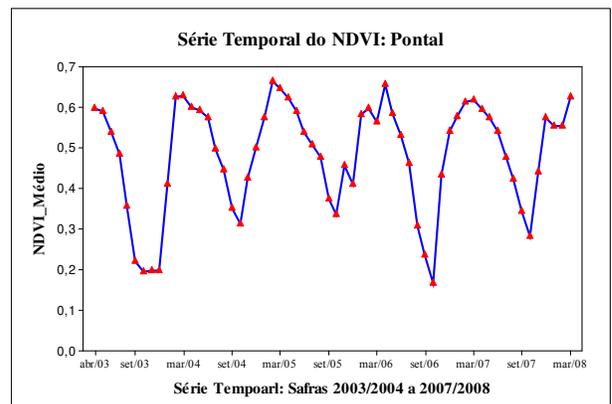


(b)

**Figura 55.** Perfil temporal dos valores médios do NDVI, nas cinco safras, para os municípios de Jaboticabal (a) e Luís Antônio (b).

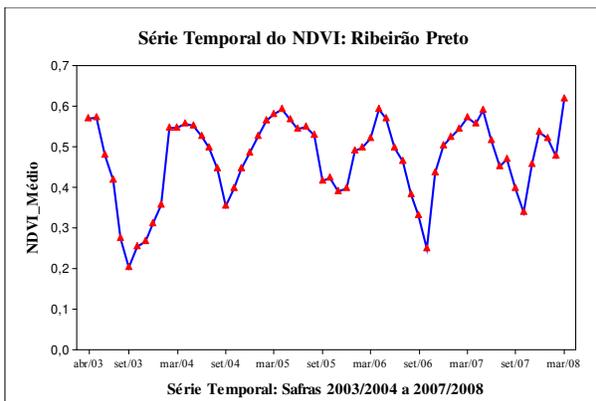


(a)

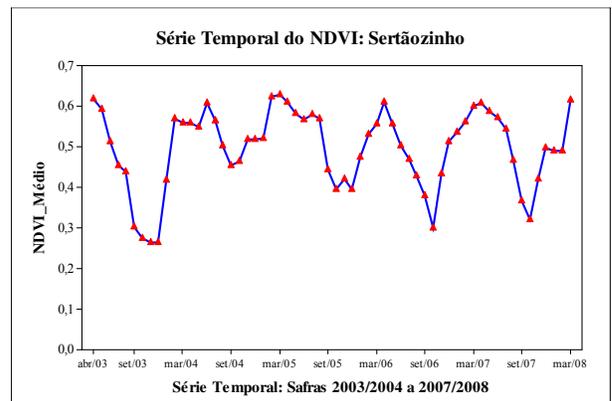


(b)

**Figura 56.** Perfil temporal dos valores médios do NDVI, nas cinco safras, para os municípios de Pitangueiras (a) e Pontal (b).



(a)



(b)

**Figura 57.** Perfil temporal dos valores médios do NDVI, nas cinco safras, para os municípios de Ribeirão Preto (a) e Sertãozinho (b).

Pode-se observar que, excepcionalmente, na safra 03/04 para o município de Araraquara, e para todos os municípios da safra 06/07, foram constatados casos onde o perfil médio do NDVI foi influenciado pela presença de nuvens ou de ruídos, cujas composições de 30 dias não foram suficientes para eliminá-las, ou ocasionados por composições MVC/NDVI resultantes de um número reduzido de imagens. Em relação ao item anterior o município também apresentou os piores resultados, quanto à determinação da área ocupada pela cana-de-açúcar.

Baseado nos dados do NDVI, foi definido o intervalo de dias para a aplicação da Equação 9, ou seja, o termo “D” – (Dias após o corte) da cultura, para estimativa da massa seca dos colmos (MSC). A variável “D” funciona como um fator de ponderação e representa o acúmulo de energia ao longo do ciclo, comumente expressa na forma de Graus-Dia ou na relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial.

Escolheu-se a variação decendial de 71 dias (início do mês de junho) a 365 dias (fim do mês de março) para caracterizar a dinâmica do crescimento vegetativo da cultura, que é mais intenso nos meses de outubro a março quando a cana-de-açúcar, no estado de São Paulo tem alta demanda de água, radiação e temperatura. Vale ressaltar, que o ano-safra inicia no mês de abril e finaliza em março do ano seguinte. No mês de abril, o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar é reduzido, o que caracteriza a fase de acúmulo de sacarose nos colmos e início do período de colheita, com redução gradativa dos valores do NDVI ao longo da série temporal de imagens.

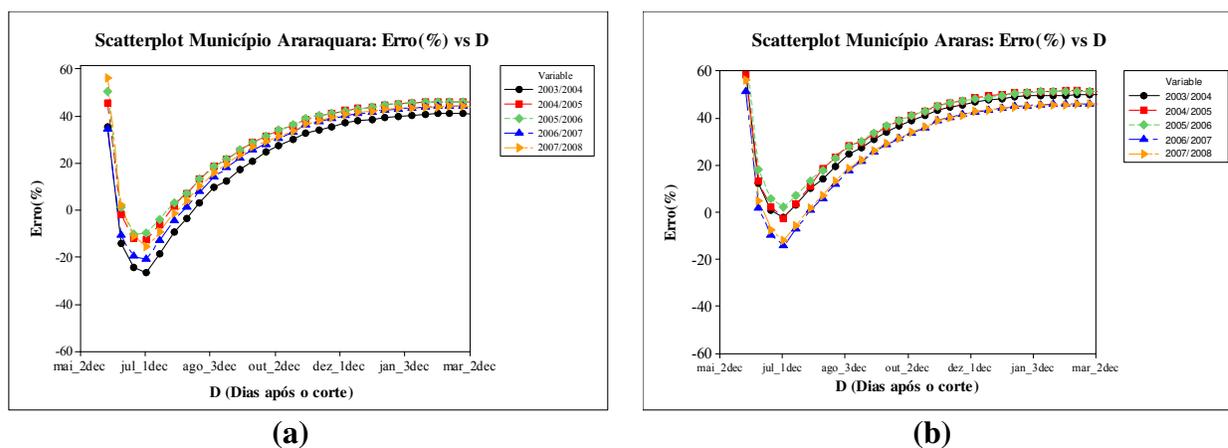
Aplicando-se os dados médios do NDVI e a variação de 71 a 365 dias do termo “D” na Equação 9, obtiveram-se os valores de MSC que associado ao modelo de crescimento fenológico, expressos nas Equações 10 e 11 que determinam a Massa Seca dos Colmos Proporcional (MSCProp) e Massa Seca Máxima (MSCMáx), estimou-se a produtividade final da cultura para cada ano-safra. A MSCProp ressalta o comportamento da cultura ao longo do ciclo de crescimento e procura minimizar a expressão da condição meteorológica, que seria a responsável principal pelas diferenças na produção final entre os ciclos (safra), em função do termo “D”. Os valores de produtividade obtidos, pelo modelo foram comparados aos dados de produtividade do IBGE (Tabela 22), considerados como referência, para as safras e os municípios em questão. Para avaliar o desempenho do modelo, em relação à estimativa oficial, foi calculado o erro relativo em porcentagem. O objetivo é identificar qual “D” resultaria em

um erro menor na estimativa da safra da cultura, e com quantos dias de antecedência em relação à próxima safra, é possível obter o valor da produtividade, mais próximo da referência.

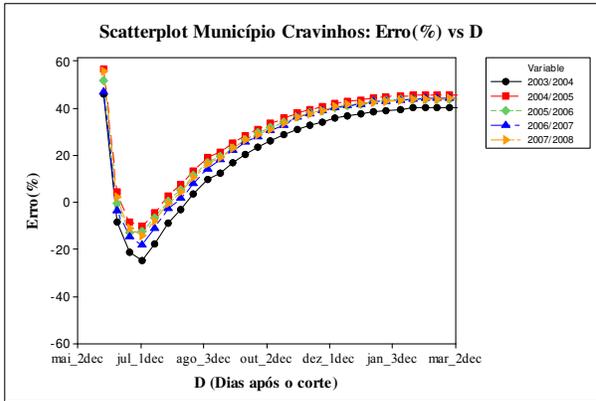
**Tabela 22. Produtividade (ton/ha) estimada a partir dos dados do IBGE, para os municípios selecionados.**

| <i>Município</i>      | <i>Safra</i><br><i>03/04</i> | <i>Safra</i><br><i>04/05</i> | <i>Safra</i><br><i>05/06</i> | <i>Safra</i><br><i>06/07</i> | <i>Safra</i><br><i>07/08</i> |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>Araraquara</i>     | 75,95                        | 82,87                        | 82,87                        | 80,00                        | 90,00                        |
| <i>Araras</i>         | 90,00                        | 92,41                        | 92,41                        | 83,00                        | 90,00                        |
| <i>Cravinhos</i>      | 75,00                        | 82,15                        | 80,00                        | 80,00                        | 83,00                        |
| <i>Guatapar</i>      | 80,00                        | 82,15                        | 80,00                        | 80,00                        | 9000                         |
| <i>Jaboticabal</i>    | 87,80                        | 92,00                        | 90,00                        | 90,00                        | 90,00                        |
| <i>Lus Antnio</i>   | 72,26                        | 77,01                        | 80,00                        | 91,78                        | 95,00                        |
| <i>Pitangueiras</i>   | 89,72                        | 86,89                        | 86,89                        | 86,33                        | 86,33                        |
| <i>Pontal</i>         | 74,89                        | 82,14                        | 80,00                        | 80,00                        | 80,00                        |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 70,00                        | 72,44                        | 70,00                        | 70,00                        | 85,00                        |
| <i>Sertãozinho</i>    | 80,00                        | 82,15                        | 80,00                        | 78,13                        | 83,00                        |

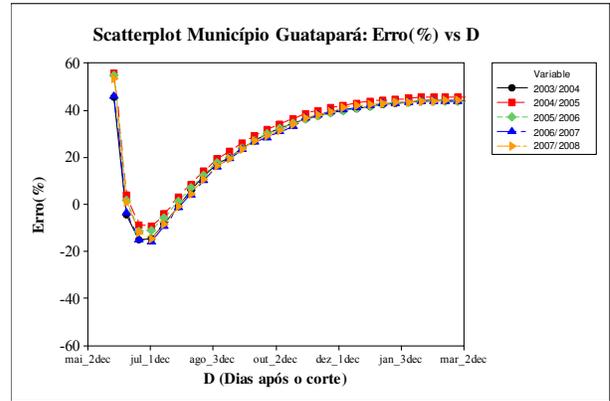
O “scatterplot” com a variação do erro relativo (%) para cada intervalo de 10 dias, dos dez municípios  apresentado nas Figuras 58 a 62.  possível observar que quando o termo “D”  inferior a 70 dias, o modelo tende a produzir erros superiores a 50% para todos os municípios e safras analisadas. Esses valores são inaceitáveis para a estimativa da produtividade. Neste período, os erros são sempre positivos, indicando que, para esta fase do desenvolvimento da cultura, o modelo tende a subestimar os valores de produtividade em relação ao dado oficial considerado (IBGE).



**Figura 58. “Scatterplot” do erro relativo (%) e do parâmetro D para os municípios de Araraquara (a) e Araras (b), nas cinco safras.**

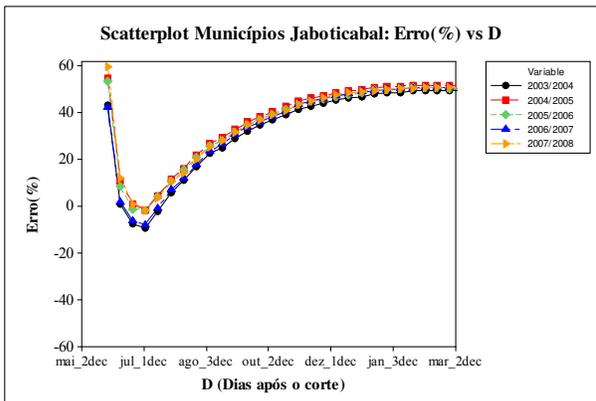


(a)

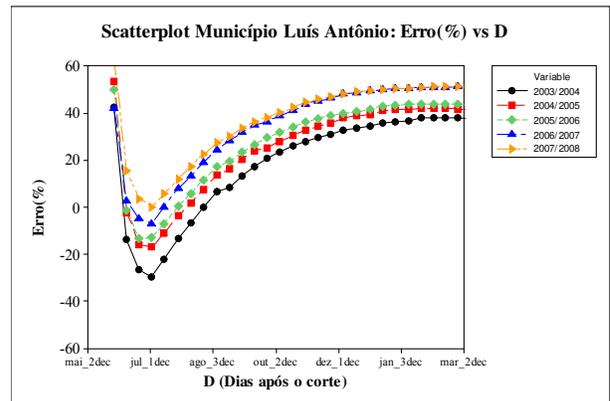


(b)

Figura 59. “Scatterplot” do erro relativo (%) e do parâmetro D para os municípios de Cravinhos (a) e Guataporá (b), nas cinco safras.

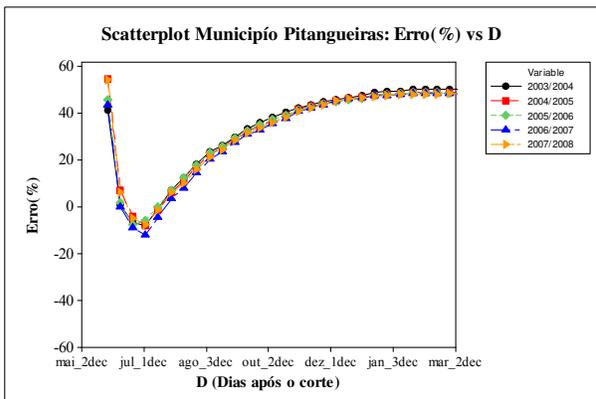


(a)

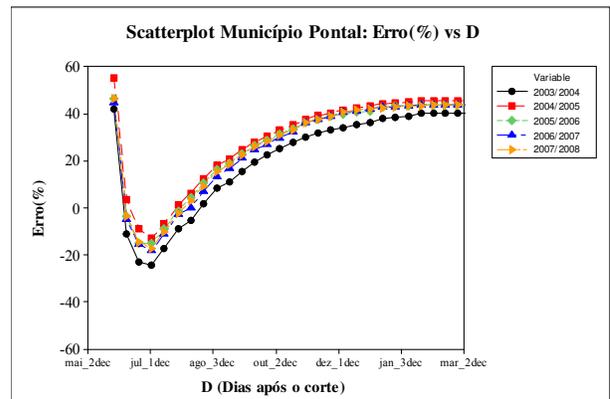


(b)

Figura 60. “Scatterplot” do erro relativo (%) e do parâmetro D para os municípios de Jaboticabal (a) e Luís Antônio (a), nas cinco safras.

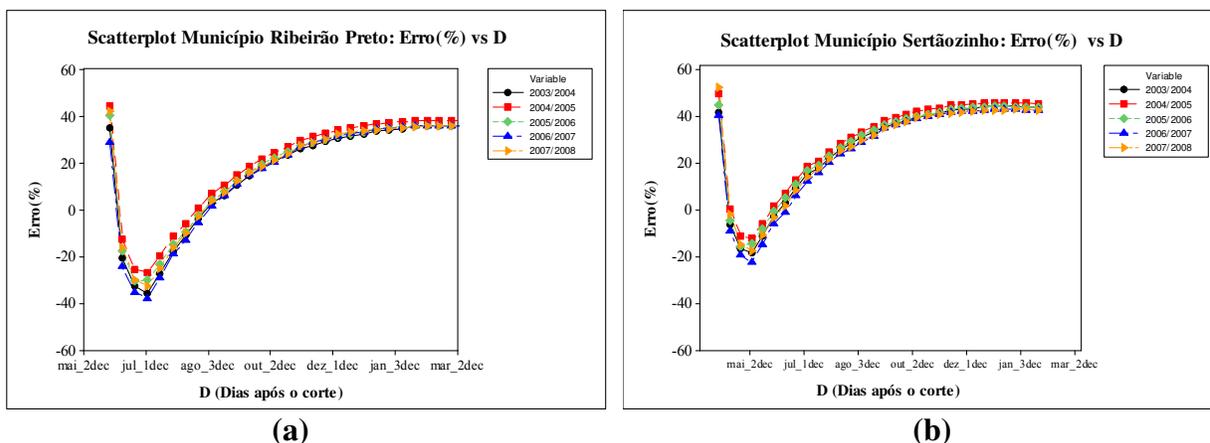


(a)



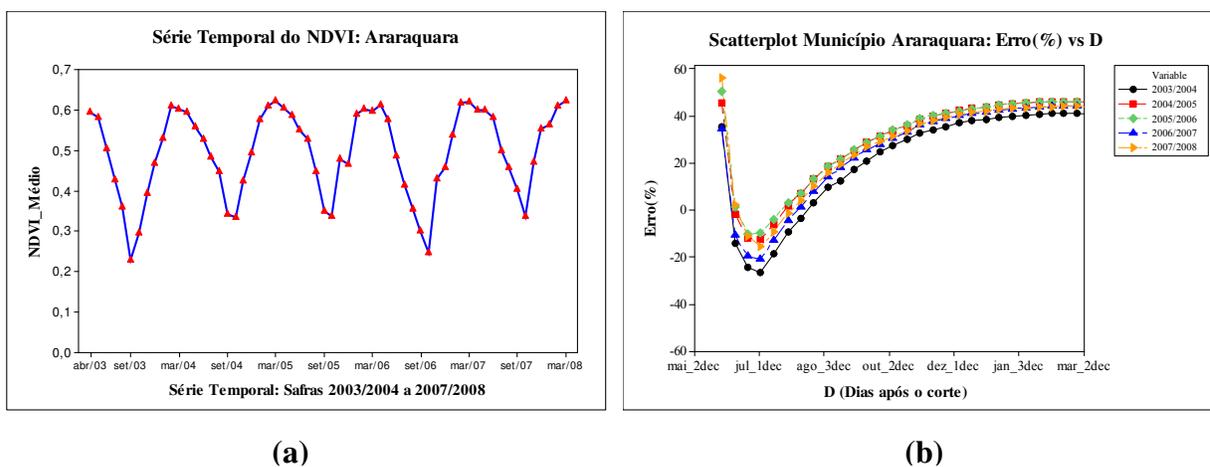
(b)

Figura 61. “Scatterplot” do erro relativo (%) e do parâmetro D para os municípios de Pitangueiras e Pontal, nas cinco safras.



**Figura 62. “Scatterplot” do erro relativo (%) e do parâmetro D para os municípios de Ribeirão Preto e Sertãozinho, nas cinco safras.**

De acordo com as Figuras 58 a 62, o modelo não é adequado para estimar a produtividade no início do ciclo. A partir do mês de junho, todos os municípios analisados começam a apresentar características distintas em relação à produtividade, para todas as safras, sendo possível observar a presença de erros negativos variando num intervalo de -0,58 a -31,48, indicando que até, o final de julho, o modelo tende a superestimar os valores de produtividade obtidos, nos municípios analisados. Diante desse contexto, o modelo apresenta duas fases críticas: a primeira fase é no início e/ou estabelecimento da cultura, e a segunda no final do ciclo. Tomando-se o município de Araraquara, como exemplo, é possível verificar através da Figura 63, que à curva obtida a partir do modelo, tem uma tendência de comportamento diretamente proporcional a curva do NDVI.



**Figura 63. Perfil temporal do NDVI para o município de Araraquara e “scatterplot” do erro relativo (%).**

No mês de abril, quando o NDVI é alto, os erros são elevados, sendo o inverso verdadeiro. Pode-se perceber, também, que a utilização de valores do NDVI no meio do ciclo da cultura gerou erros inferiores a 6%, tornando-se mais apropriado. A Tabela 23 mostra a produtividade final obtida pelo modelo, a produtividade oficial, ambas em ton/ha, e o erro relativo (%) dos municípios, entre as duas estimativas.

**Tabela 23. Resultados da MSC Máxima do Ciclo estimada pelo modelo e o erro relativo (%) nas distintas safras.**

| <i>Safra 03/04</i>    |          |                           |  |                          |
|-----------------------|----------|---------------------------|--|--------------------------|
| <i>Municípios</i>     | <i>D</i> | <i>Produtividade IBGE</i> | <i>Produtividade Modelo MSC Máxima</i> | <i>Erro Relativo (%)</i> |
| <i>Araraquara</i>     | 132      | 75,95                     | 73,37                                  | <b>3,39</b>              |
| <i>Araras</i>         | 91       | 90,00                     | 89,17                                  | <b>0,91</b>              |
| <i>Cravinhos</i>      | 132      | 75,00                     | 72,30                                  | <b>3,58</b>              |
| <i>Guatapar</i>      | 122      | 80,00                     | 76,48                                  | <b>4,39</b>              |
| <i>Jaboticabal</i>    | 81       | 87,80                     | 87,17                                  | <b>0,71</b>              |
| <i>Lus Antnio</i>   | 132      | 72,26                     | 72,17                                  | <b>0,11</b>              |
| <i>Pitangueiras</i>   | 81       | 89,72                     | 88,86                                  | <b>0,95</b>              |
| <i>Pontal</i>         | 132      | 74,89                     | 73,11                                  | <b>2,37</b>              |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 142      | 70,00                     | 67,71                                  | <b>3,26</b>              |
| <i>Sertãozinho</i>    | 122      | 80,00                     | 77,55                                  | <b>3,05</b>              |
| <i>Safra 04/05</i>    |          |                           |  |                          |
| <i>Municípios</i>     | <i>D</i> | <i>Produtividade IBGE</i> | <i>Produtividade Modelo MSC Máxima</i> | <i>Erro Relativo (%)</i> |
| <i>Araraquara</i>     | 111      | 82,87                     | 81,37                                  | <b>1,80</b>              |
| <i>Araras</i>         | 91       | 92,41                     | 88,34                                  | <b>4,40</b>              |
| <i>Cravinhos</i>      | 111      | 82,15                     | 79,83                                  | <b>2,82</b>              |
| <i>Guatapar</i>      | 111      | 82,15                     | 80,33                                  | <b>2,20</b>              |
| <i>Jaboticabal</i>    | 91       | 92,00                     | 91,33                                  | <b>0,72</b>              |
| <i>Lus Antnio</i>   | 122      | 77,01                     | 75,94                                  | <b>1,37</b>              |
| <i>Pitangueiras</i>   | 111      | 86,89                     | 81,68                                  | <b>5,99</b>              |
| <i>Pontal</i>         | 111      | 82,14                     | 81,10                                  | <b>1,25</b>              |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 132      | 72,44                     | 71,70                                  | <b>1,01</b>              |
| <i>Sertãozinho</i>    | 111      | 82,15                     | 80,83                                  | <b>1,59</b>              |

*Continua...*

**Tabela 23. Resultados da MSC Máxima do Ciclo estimada pelo modelo e o erro relativo (%) nas distintas safras.**

*Continuação*

| <i>Safra 05/06</i>    |          |                           |  |                          |
|-----------------------|----------|---------------------------|--|--------------------------|
| <i>Municípios</i>     | <i>D</i> | <i>Produtividade IBGE</i> | <i>Produtividade Modelo MSC Máxima</i> | <i>Erro Relativo (%)</i> |
| <i>Araraquara</i>     | 81       | 82,87                     | 81,67                                  | <b>1,43</b>              |
| <i>Araras</i>         | 101      | 92,41                     | 90,70                                  | <b>1,84</b>              |
| <i>Cravinhos</i>      | 111      | 80,00                     | 79,56                                  | <b>0,54</b>              |
| <i>Guatapar</i>      | 111      | 80,00                     | 79,40                                  | <b>0,74</b>              |
| <i>Jaboticabal</i>    | 101      | 90                        | 86,53                                  | <b>3,80</b>              |
| <i>Luis Antnio</i>   | 122      | 80,00                     | 75,58                                  | <b>5,52</b>              |
| <i>Pitangueiras</i>   | 81       | 86,89                     | 85,58                                  | <b>1,50</b>              |
| <i>Pontal</i>         | 122      | 80,00                     | 75,97                                  | <b>5,02</b>              |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 142      | 70,00                     | 66,92                                  | <b>4,39</b>              |
| <i>Sertãozinho</i>    | 122      | 80,00                     | 75,85                                  | <b>5,17</b>              |
|                       |          |                           | <b><i>MSC Máxima</i></b>               |                          |
| <i>Araraquara</i>     | 122      | 80,00                     | 78,76                                  | <b>1,56</b>              |
| <i>Araras</i>         | 111      | 83,00                     | 82,34                                  | <b>0,79</b>              |
| <i>Cravinhos</i>      | 122      | 80,00                     | 78,61                                  | <b>1,73</b>              |
| <i>Guatapar</i>      | 122      | 80,00                     | 78,79                                  | <b>1,50</b>              |
| <i>Jaboticabal</i>    | 81       | 90,00                     | 88,46                                  | <b>1,71</b>              |
| <i>Luis Antnio</i>   | 101      | 91,78                     | 88,11                                  | <b>3,99</b>              |
| <i>Pitangueiras</i>   | 122      | 86,33                     | 83,31                                  | <b>3,49</b>              |
| <i>Pontal</i>         | 122      | 80,00                     | 78,95                                  | <b>1,30</b>              |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 142      | 70,00                     | 68,58                                  | <b>2,02</b>              |
| <i>Sertãozinho</i>    | 132      | 78,13                     | 73,47                                  | <b>5,95</b>              |
| <i>Safra 07/08</i>    |          |                           |  |                          |
| <i>Municípios</i>     | <i>D</i> | <i>Produtividade IBGE</i> | <i>Produtividade Modelo MSC Máxima</i> | <i>Erro Relativo (%)</i> |
| <i>Araraquara</i>     | 91       | 90,00                     | 88,70                                  | <b>1,45</b>              |
| <i>Araras</i>         | 91       | 90,00                     | 89,08                                  | <b>1,01</b>              |
| <i>Cravinhos</i>      | 111      | 83,00                     | 80,27                                  | <b>3,28</b>              |
| <i>Guatapar</i>      | 81       | 90,00                     | 89,52                                  | <b>0,52</b>              |
| <i>Jaboticabal</i>    | 91       | 90,00                     | 89,34                                  | <b>0,72</b>              |
| <i>Luis Antnio</i>   | 101      | 95,00                     | 91,15                                  | <b>4,04</b>              |
| <i>Pitangueiras</i>   | 132      | 75,00                     | 72,57                                  | <b>3,23</b>              |
| <i>Pontal</i>         | 122      | 80,00                     | 77,40                                  | <b>3,24</b>              |
| <i>Ribeirão Preto</i> | 111      | 85,00                     | 81,10                                  | <b>4,58</b>              |
| <i>Sertãozinho</i>    | 111      | 83,00                     | 80,54                                  | <b>2,96</b>              |

Ressalta-se que, quando são utilizados dados de NDVI do meio do ciclo da cultura, os erros encontrados variaram numa faixa entre 0,52 a 6%. Esses erros indicam que a adaptação do modelo, considerando-se apenas os pixels com a presença da cultura e o valor médio do NDVI, mostrou-se bastante satisfatória, o que torna o modelo uma ferramenta viável a ser aplicado no apoio ao acompanhamento e previsão de safras da cana-de-açúcar quando utilizado da maneira proposta, permitindo um monitoramento mais frequente das condições de campo e a obtenção de resultados de uma maneira mais rápida e menos subjetiva.

Todos os erros relativos (%) obtidos através da comparação entre os valores de produtividade do IBGE e do modelo fenológico-espectral foram considerados baixo, de acordo com a terminologia proposta por PIMENTEL-GOMES (2000). Notou-se que, os menores erros relativos foram observados entre os meses de julho e agosto. Este período está diretamente relacionado com a diminuição da precipitação pluviométrica em todo o estado, conseqüentemente para a cultura em geral, coincidindo com a época de estresse hídrico e com de redução dos valores do índice de vegetação NDVI.

#### **4.3.2 Análise estatística**

A partir dos resultados descritos acima, pode-se afirmar que a utilização do modelo fenológico-espectral, pode ser uma ferramenta viável na determinação da produtividade da cultura nos municípios considerados, porém a resposta em relação ao termo “D” e, conseqüentemente, a identificação do menor erro, é variável em cada ano-safra. Na prática, o ideal seria identificar um valor “D”, que fosse representativo na determinação da produtividade e que proporcionasse resultados favoráveis para implementação em sistemas de monitoramento e previsão de safra da cultura. Para contornar essa variação, foram propostos dois modelos, baseados em equações de regressão. O primeiro modelo, chamado *Modelo1\_MédiaSafras*, considera a média do termo “D”, sem distinção dos municípios nas quatro safras, ou seja, qual o “D” médio obtido em cada ano-safra. O segundo modelo, ou *Modelo 2\_MédiaMunicípio*, ao contrário do anterior, considera a resposta do termo “D” para cada município em cada ano-safra e a finalidade de gerar uma equação que represente cada localidade, baseada no menor erro relativo encontrado entre a estimativa de produtividade obtida através do modelo fenológico-espectral e a considerada oficial fornecida pelo IBGE.

O objetivo final dessa análise foi gerar uma equação que possa ser utilizada, de maneira precisa e satisfatória na determinação da produtividade, tornando a utilização do modelo proposto mais prática. As equações de regressão foram desenvolvidas utilizando as respostas, apresentada na Tabela 23 para as safras 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 e validadas na safra 07/08.

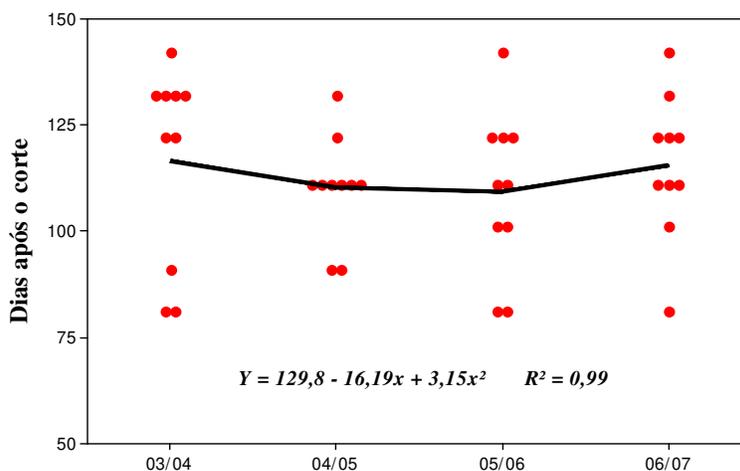
#### 4.3.2.1 Análise estatística: Modelo 1\_MédiaSafras

Com base nos resultados obtidos na Tabela 23, foi calculada a média do termo “D”, para as safras 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07, considerando-se todos os municípios. A Tabela 24 apresenta os valores médios obtidos e utilizados na análise de regressão.

**Tabela 24. Média do termo “D” para cada ano-safra.**

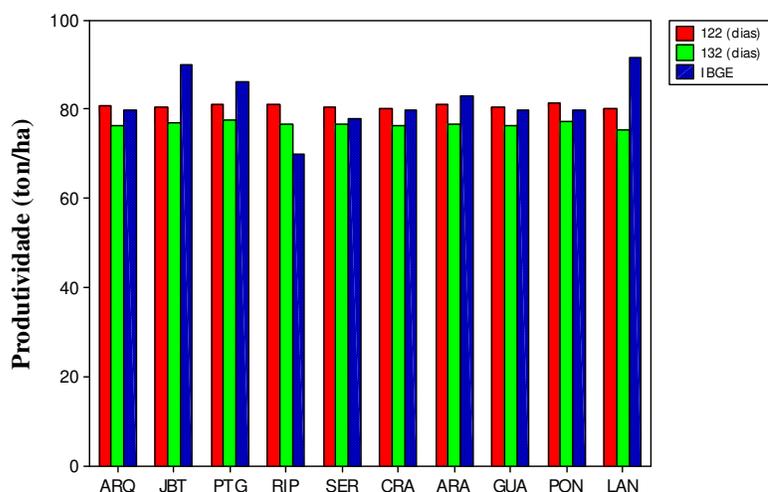
| <i>Safras</i> | <i>“D”Médio</i> |
|---------------|-----------------|
| <b>03/04</b>  | 117             |
| <b>04/05</b>  | 110             |
| <b>05/06</b>  | 109             |
| <b>06/07</b>  | 116             |

A curva obtida a partir da média do termo “D”, para cada ano-safra, é apresentada na Figura 64, com a equação de regressão e o coeficiente de determinação. O modelo foi utilizado para determinar o termo “D” da safra seguinte, safra 07/08, ou seja, qual o dia após o corte da cultura em que pode ser obtido o menor erro relativo, em relação à estimativa de produtividade oficial do IBGE.



**Figura 64. Curva e coeficiente de determinação da regressão para o Modelo\_1.**

O termo “D” estimado para safra 07/08 pela equação foi 127, ficando entre o intervalo de 122 a 132 dias após o corte, que corresponde ao final do mês de julho e início do mês de agosto. Para testar a viabilidade da utilização desse resultado foi calculada a produtividade (ton/ha) nos dias 122 e 132 para cada município e comparado com dados do IBGE (Tabela 22). Os resultados apresentados na Figura 65 indicam que os valores de produtividade obtidos foram subestimados nos municípios de Jaboticabal (JBT), Luís Antônio (LAN) e Pitangueiras (PTG), com relação ao IBGE. Apenas para o município de Ribeirão Preto (RIP), a produtividade foi superestimada. Nos demais municípios: Araraquara (ARQ), Sertãozinho (SER), Cravinhos (CRA), Araras (ARA), Guatapar (GUA) e Pontal (PON), a estimativa de produtividade obtida em 122 e 132 dias são proximos ao dado oficial.



**Figura 65. Comparo da produtividade oficial do IBGE com as obtidas a partir do termo “D” a 122 e 132 dias.**

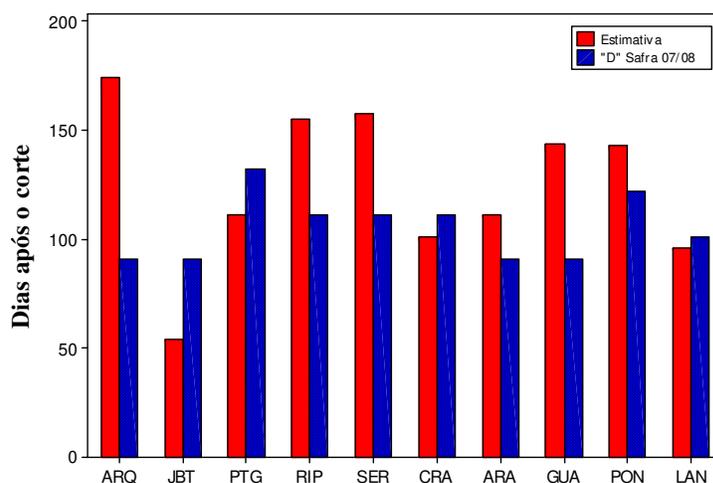
#### 4.3.2.2 Análise estatística: Modelo 2\_MdiaMunicpio

O segundo modelo, chamado *Modelo2\_MdiaMunicpio*, considerou o dia após o corte da cultura com o menor erro, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 23. Esta análise foi realizada nas safras 03/04, 04/05, 05/06 e 06/07 e testada na safra 07/08. As equaoes de regressão determinadas em cada município são apresentadas na Tabela 25 com os respectivos coeficientes de determinao. Os municípios Pitangueiras (PTG) e Ribeirão Preto (RIP) apresentaram o coeficiente de determinao mais baixo, quando comparados com os demais municípios, sendo iguais a 0,20 e 0,40, respectivamente.

**Tabela 24. Equações de regressão e coeficiente de determinação obtido em cada município.**

| <i>Município</i>      | <i>Equação</i>                        | <i>R<sup>2</sup></i> |
|-----------------------|---------------------------------------|----------------------|
| <i>Araraquara</i>     | $\hat{Y} = 204 - 83,5x + 15,5x^2$     | 0,78                 |
| <i>Araras</i>         | $\hat{Y} = 81 + 7x$                   | 0,89                 |
| <i>Cravinhos</i>      | $\hat{Y} = 132 - 6,3x$                | 0,70                 |
| <i>Guatapar</i>      | $\hat{Y} = 144 - 27,5x + 5,5x^2$      | 0,95                 |
| <i>Jaboticabal</i>    | $\hat{Y} = 48,5 + 38,5x - 7,5x^2$     | 0,84                 |
| <i>Luis Antonio</i>   | $\hat{Y} = 142,5 - 9,3x$              | 0,85                 |
| <i>Pitangueiras</i>   | $\hat{Y} = 81 + 6x$                   | 0,20                 |
| <i>Pontal</i>         | $\hat{Y} = 152,75 - 28,15x + 5,25x^2$ | 0,60                 |
| <i>Ribeirão Preto</i> | $\hat{Y} = 149,5 - 11,5x + 2,5x^2$    | 0,40                 |
| <i>Sertãozinho</i>    | $\hat{Y} = 137,75 - 22,15x + 5,25x^2$ | 0,88                 |

Na Figura 66 pode-se perceber que o modelo utilizado por município na determinao do termo “D” para a safra 07/08 foi variável em relao ao dia após o corte encontrado pela equao da massa seca dos colmos. Nos municípios de Pitangueiras (PTG), Cravinhos (CRA), Luís Antônio (LAN), Pontal (PON) e Araras (ARA), o modelo mostrou-se eficiente, pelo “D” estimado podemos obter a produtividade próxima ao dado pelo IBGE. Nos demais municípios: Araraquara (ARQ), Ribeirão Preto (RIP), Sertãozinho (SER), Guatapar (GUA) e Jaboticabal (JBT) o modelo não foi eficiente na estimativa desse parâmetro. Os resultados apontam que o *Modelo1* apresentou resultados mais coerentes na determinao da produtividade dos municípios utilizados na análise.



**Figura 66. Termo “D” obtido pela equao de regressão para cada município.**

## 5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos no trabalho, pode-se concluir que foram alcançados os objetivos estabelecidos, mostrando-se adequada as metodologias de trabalho propostas e utilizadas com base na série temporal de imagens do sensor AVHRR/NOAA-17. Dentre as principais conclusões pode-se destacar:

1. A técnica da análise harmônica aplicada à série de composições MVC/NDVI obtidas das imagens AVHRR/NOAA-17 permitiu a obtenção de informações sobre a cana-de-açúcar, possibilitando a sua identificação, validando uma das hipóteses deste trabalho.
2. As áreas com cana-de-açúcar foram bem modeladas, nas cinco safras analisadas, permitindo sua diferenciação entre outras culturas, nas composições RGB utilizadas, em função dos respectivos ciclos vegetativos.
3. A análise harmônica reduziu a dimensionalidade da série temporal de 766 imagens, de modo que apenas os primeiros harmônicos foram suficientes para representar toda a informação para a cana-de-açúcar, nas cinco safras estudadas.
4. A partir da classificação das imagens amplitude, termo aditivo e fase foi gerado um mapa representando a distribuição espacial das áreas com a cultura no estado. Neste mapa a classe cana-de-açúcar está representada em função da área ocupada, sendo este parâmetro avaliado a partir de duas metodologias distintas: Expansão direta e Matriz de erro. Os resultados obtidos em cada ano-safra foram comparados com o dado considerado referência, fornecidos pelo projeto CANASAT/INPE. Verificou-se, que os menores erros relativos foram encontrados a partir da estimativa baseado na Matriz de erro.
5. Há uma forte evidência que o número de imagens na série está diretamente relacionado à melhoria dos resultados obtidos na avaliação da área. Para a safra 07/08 os erros relativos entre as estimativas (CANASAT x Matriz de erro) foram inferiores a 10%, para os municípios estudados.
6. As classificações, com exceção da safra 03/04, foi considerada boa, indicando que a análise harmônica é uma metodologia viável, na identificação da cultura em questão, mesmo utilizando algoritmos mais simples de classificação supervisionada.

7. Apesar da metodologia de expansão direta, utilizada na determinação da área ocupada pela cultura, levar em consideração o resultado da classificação, este método não apresentou resultados que incentivassem e/ou favorecessem a sua utilização, em um sistema de suporte a previsão de safra, de acordo com a metodologia proposta no estudo, para os municípios analisados.
8. Como o *p-value* foi menor que 0,05 para todos os resultados das comparações, a associação entre as estimativas foi considerada estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95%. Isso indica que as estimativas são fortemente correlacionadas e possuem a mesma tendência, movendo-se em perfeita proporção na mesma direção, em relação ao aumento da área ocupada pela cultura nas cinco safras estudadas.
9. Quanto ao modelo fenológico-espectral, a utilização de imagens do AVHRR/NOAA-17 apresentou resultados bastante satisfatórios, possibilitando um aumento da objetividade dos métodos de acompanhamento e previsão de safras.
10. Quando empregado na forma proposta, o modelo é capaz de fornecer uma estimativa da produtividade com erro de aproximadamente 5%, em relação à estimativa obtida por órgãos oficiais como o IBGE.
11. Ao ser aplicado como modelo de crescimento, este apresentou resultados favoráveis para apoio ao acompanhamento e previsão de safra da cultura. A utilização de valores de NDVI do meio do ciclo da cultura gerou melhores resultados quando aplicado nas fórmulas de Massa Seca de Colmos e nas fórmulas de MSC Máxima e Proporcional. O modelo possibilitou um monitoramento mais frequente das condições de campo e a obtenção de resultados de uma maneira mais rápida e objetiva.
12. A equação de regressão, considerando o dia após o corte em torno de 122 a 132 dias, foi a que apresentou resultado melhor na estimativa da produtividade.
13. Devido ao baixo custo de aquisição das imagens, à longevidade do sistema, à abrangência espacial das imagens e à possibilidade de geração de índices a partir de suas bandas espectrais, a utilização de metodologias que envolvam a aplicação da série temporal dessas imagens, é uma ferramenta útil em sistemas operacionais de acompanhamento e previsão de safras.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALFONSI, R. R. **Condições climáticas para a cana-de-açúcar.** In: PARANHOS, S. B. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, v.1, n.135, p.42-81, set. 1987.

ANDERSON, J.E.; FISHER, R.L.; DELOACH, S.R. Remote sensing and precision agriculture: ready for harvest or still maturing?. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.10, p.1118-1123, Oct. 1999.

ANTUNES, J. F. G. Aplicação de lógica *fuzzy* para estimativa de Área plantada da cultura de soja utilizando Imagens AVHRR-NOAA. 105p. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

ARENAS-TOLEDO, J.M. Crop type discrimination by harmonic analysis of EVI/MODIS time-series data and medium spatial resolution imagery. 130p. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, INPE. 2008.

AZZALI, S.; MENENTI, M. Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern África using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. **International Journal of Remote sensing**, v. 21, n. 5, p. 973 - 996, 2000.

BARBOSA, H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região nordeste do Brasil em 1982-85.** 169p. (INPE-7237-TDI/690). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y. E.; LAWRENCE, W.T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.15, p.3195-3210, 1997.

BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1.,1979. Mossoró. **Anais ...** Mossoró: SBAgro, 1979. P. 192-197.

BELIK, W.; RAMOS, P.; VIAN, C.E.F, Mudanças Institucionais e seus impactos nas estratégias dos capitais do complexo agroindustrial canavieiro no Centro-Sul do Brasil, In: Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural, 36., Poços de Caldas, 1998.

BNDES. Bioetanol de cana-de-açúcar – Energia para o desenvolvimento sustentável. <<http://www.bioetanoldecana.org>>, 13/10/2009.

BRAGA, H. J. Previsão agrícola: uma nova abordagem - **Uso de scanner aerotransportável e redes neurais**. 1995. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1995.

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

COHEN, J. A. **Coefficient of agreement for nominal scales**. Educational and Psychological Measurement, Durham, v.20, n.1, p.37-46, 1960.

DAVIS, J.C. **Statistics and data analysis in geology**. New York: J. Wiley and Sons, 1986. 646p.

DEFRIES, R.,HANSEN, M., TOWNSHEND, J. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR/NOAA parthfinder data. **Remote Sensing of Environment**, v.54, p. 209-222, 1995.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ANTUNES, J. F. G.; EMERY, W.; BALDWIN, D. G.; ZULLO JÚNIOR, J. An Automatic System for AVHRR Land Surface Product Generation. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.18, p. 3925 - 3942, 2006.

EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Estimativa de Áreas Agrícolas Municipais utilizando Sistema de Amostragem Simples sobre Imagens de Satélite. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 187-197, 2002.

FAO - **Food and agriculture organization of the United Nations**. Disponível em <http://faostat.fao.org/>, 02/08/2007.

FELL, F.; FICHER, J.; PREUSKER, R.; SCHÖDER, T. **Automated atmospheric correction of AVHRR channel 1 and 2 data using dark surface targets**. <[http://userpage.fu-berlin.de/~termotom/papers/TS\\_2001\\_IGARSS\\_Sidney.pdf](http://userpage.fu-berlin.de/~termotom/papers/TS_2001_IGARSS_Sidney.pdf)>, 17/07/2004.

GLERIANI, J. M. **Redes Neurais artificiais para classificação espectro-temporal de culturas agrícolas**. 212p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

GOODRUM, G.; KIDWELL, K. B.; WINSTON, W. (Eds). **NOAA KLM user's guide**. Washington, D.C.: NOAA/NESDIS/NCDC/CSD/SSB, 2001.

GUYOT, G. Signature spectrales des surfaces naturelles. Collection "Télédétection stellaire". Caen: Édition Paradigme, 1989, 178p.

JACKSON, R.D. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. **Proceedings of SPIE**. The International Society for Optical Engineering, Arlington, Virginia, v.475, p.81-96. 1984.

JAKUBAUSKAS, M.E.; LEGATES, D.R.; KASTENS, J.H. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 4, p. 461 - 470, 2001.

JAKUBAUSKAS, M.E.; PETERSON, D.L.; KASTENS, J.H.; LEGATES, D.R. Time series remote sensing of landscape-vegetation interactions in the Southern Great Plains. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 10, p. 1021 - 1030, 2002a.

JAKUBAUSKAS, M.E.; LEGATES, D.R.; KASTENS, J.H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, p. 127 - 139, 2002b.

JUPP, D. L. B. The Stability of Global Estimates from Confusion Matrices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 9, p. 1563-1569, 1989.

KIDWELL, K.B. NOAA Polar Orbiter Data. Users Guide. NOAA/NESDIS/OSDPD, Washington, D.C., USA, 1995, 296p.

KING, D. **Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts**. Ispra: Joint Research Centre, 1989. 25p.

LANDIS, J.R., KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33 , p.159-174, 1977.

LIU, W. T.; MASSAMBANI, O; FESTA, M. Normalized difference vegetation index for the south American continent used as a climatic variability indicator. **In:** 24th International Symposium of Remote Sensing of Environment, Rio de Janeiro, 27-31 May 1991 (Ann Arbor:ERIM), pp. 725-732.

LILLESAND, T. M. & KIEFEL, R. W. **Remote sensing and image interpretations**. 3.a Ed. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1994.

LLOYD, D. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n. 12, p. 2269-2279, 1990.

LUIZ, A. J. B. Estatísticas agrícolas por amostragem auxiliadas pelo sensoriamento remoto. INPE, São José dos Campos, SP, 2003. (Tese de Doutorado).

MARQUES, E.S. **O Estado da Arte da Agricultura Brasileira**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/seminario/EduardoSampaio.pdf>>, 02/05/2006.

MOODY, A.; JOHNSON, D.M. Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete fourier transform. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n.3, p. 305 – 323, 2001.

MORAN, M.S; INOUE, Y; BARNES, E.M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, v.61,n.3, p.319-346, Sep. 1997.

MOREIRA, M. D. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

MORETTIN, P.A., TOLOI, C.M.C. **Análise de séries temporais**. Edgar Blücher, 2004.

NASCIMENTO, C.R.; ZULLO JUNIOR, J.; ROMANI, L.; RODRIGUES, L. H. A. Identification of sugar cane fields in the state of sao paulo using a time series of AVHRR/NOAA satellite images. In: The Fifth International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images (MultiTemp-2009), Mystic, Connecticut. **Anais...** v. 1. p. 104-111

NEVES, M. F. CANEJERO, M. A. e AMARAL, R. O. **Estratégias para Bioenergia da Cana-de-Açúcar**. Uma Agenda para Manter a Liderança Mundial. Markestrat. 2009.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e Aplicações**. 12 ed. São Paulo- SP, 1992.

NUNES JR, D. M. S. Variedades de cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação Cargill, 1987. 856p. cap.2 v.1, p.187-259.

PANOFSKY, H.A.; BRIER, G.W. **Some applications of statistics to meteorology**. Pennsylvania: University Park, 1968. 224 p.

PARDI LACRUZ, M.S. Análise harmônica de séries temporais de dados *MODIS* como uma nova técnica para a caracterização da paisagem e análise de lacunas de conservação. 2006. 130 p. Tese (Doutorado)- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo.

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. 116 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.

PICOLI, M. C. A. **Estimativa da produtividade agrícola da Cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: Estudo de Caso Usina Catanduva**. 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais São José dos Campos, São Paulo.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14 Edição. Piracicaba: ESALQ, 477 p., 2000.

PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LOURENÇO, L. S.; LAMPARELLI, R. A. C.; MACHADO, H. M. **Análise da evolução temporal do índice de vegetação (NDVI) em talhões comerciais de cana-de-açúcar**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 32, 2003, Goiânia. **Anais...** Goiânia, p. 42-51, 2003.

POTTER, C. S.; BROOKS, V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.15, p.2921-2948, 1998.

PREVIDELLI, I.T.S. Estimadores de máxima verossimilhança corrigidos para modelos superdispersados não-lineares. São Carlos: UFSC. **Tese de Doutorado em Economia**. 2004.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A.R.; KERR, Y.H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, v. 48, p. 119-126, 1994.

REED, B. C., BROWN, J. F. VANDERZEE, D. LOVELAND, T. R. MERCHANT, J. W., OHLEN, D. O. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of Vegetation Science**, n.5, p. 703-714, 1994.

RICHARDS, J.A. **Remote Sensing Digital Image Analysis** , Second Edition, New York: Wiley, 1993.

RICHARDS, J. A.; JIA, X., **Remote sensing digital image analysis: an introduction**, 3 Edition. New York: Springer Verlag, 363p., 1999.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 204 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos campos. 2004.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens Landsat na estimativa de área plantada com soja em municípios do Rio Grande do sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p.231-238. CD-ROM.

ROERINK, G.J.; MENENTI, M.; VERHOEF, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21,n. 9, p. 1911–1917. 2000.

ROSBOROUGH, G. W.; BALDWIN, D. G.; EMERY, W. J. Precise AVHRR image navigation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32, n.3, p.644-657, 1994.

ROUSE, J.W.;HASS, 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., Proceedings...Washington, D.C.: NASA, v.1, p.309-317,1973.

RUDORFF, B.F.T.; BATISTA, G.T. **Resposta Espectral da Cana-de-açúcar Através de Dados Multiespectrais do MSS do Landsat-4.** In: IV Reunião da Sociedade de Especialistas latinoamericanos em Sensoriamento Remoto – Selper, 4, 1984. Chile. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1985. 12p. Publicado como: (INPE-3474-PRE/717).

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G.T. Relatório da fase I do projeto ESTIMA: desenvolvimento de um modelo para estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar baseado em dados Landsat e agrometeorológicos. 93p. Relatório Técnico – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 1988.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugar-cane based on agrometeorological - spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p.183-192, September 1990.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Wheat yield estimation at the farm level using Landsat-TM and agrometeorological data. **International Journal Of Remote Sensing**, v. 12, n.12, p. 2477-2484, 1991.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; XAVIER, A. C.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. **Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas**

**de geoprocessamento: ano safra 2003/2004.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. 47 p. (INPE-10791-RPQ/759).

STEVEN, M.D.; JAGGARD, K.W. Advances in crop monitoring by remote sensing. In: Danson, F.M.; Plummer, S. E. ed. **Advances in Environmental Remote Sensing.** 1ed. Baffins Lane, England. Wiley, 1995, cap. 9, p.143-156.

SCHOWENGERDT, R. A.; **Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing;** pp.135 a 150, Academic Press, 1997.

STORY, M.; CONGALTON, R. G. **Accuracy assessment: a user's perspective.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bethesda, v.52, n.3, p.397-399, 1986.

TAYLOR, J.C.; THOMAS, G.; WOOD, G.A. Mapping yield potential with remote sensing. In: Proceedings of the First European Conference on Precision Agriculture, J.V. Stafford, (Ed.), London, SCI, v.2, p.713-72, 1998.

UNICA. Posição da safra 04/05. **Informação UNICA,** São Paulo, ano 7, n. 62, p.4-5, nov/dez 2004.

USDA – UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Data and Statistics. United State Department of Agriculture, 2008. Disponível em: <http://www.usda.gov>. Acesso em: setembro de 2009.

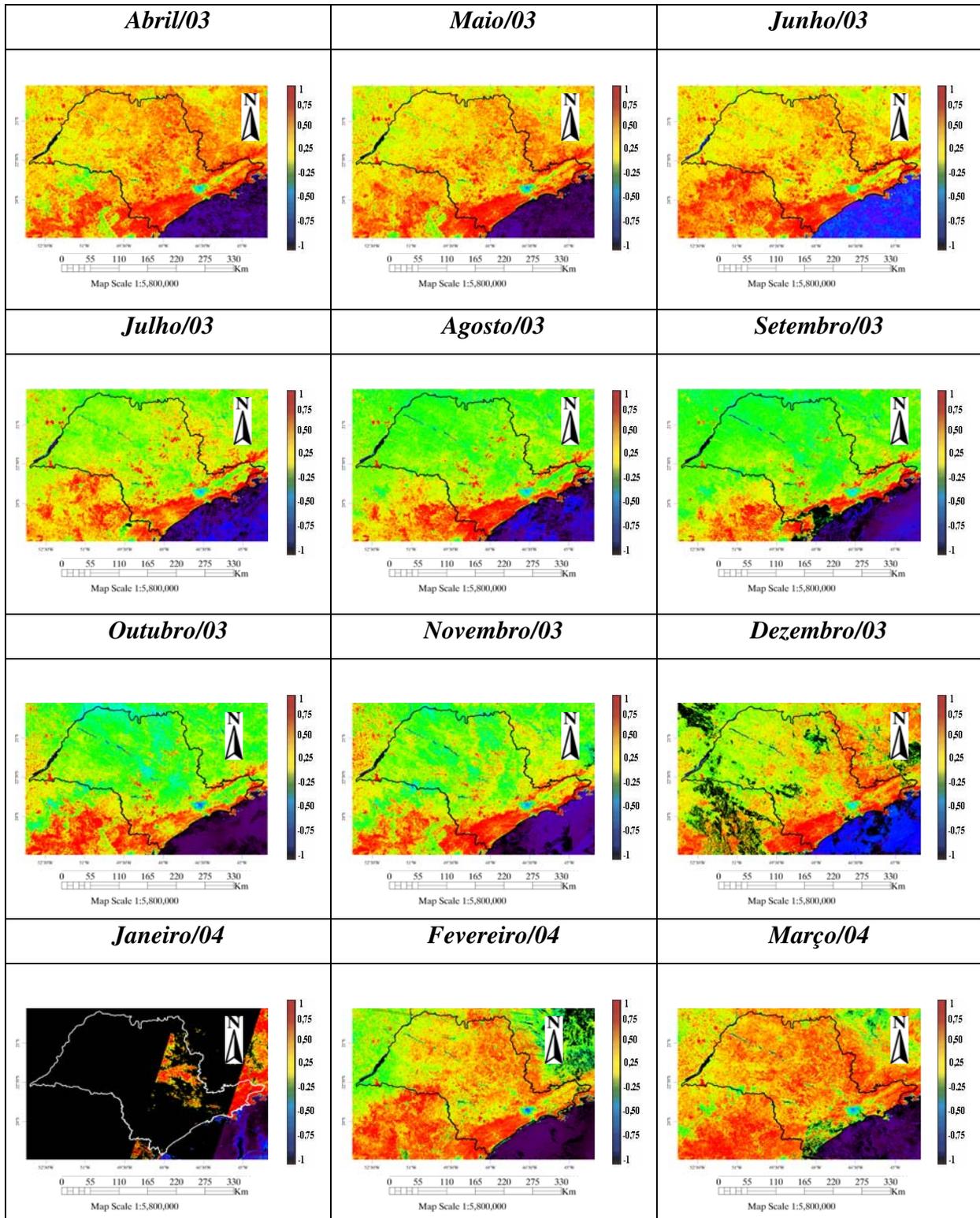
WADA, Y.; OHIRA, W. Reconstructing Cloud-Free SPOT/Vegetation Using Harmonic Analysis with Local Maximum Fitting. 25th Asian Conference & 1th Asian Space Conference on Remote Sensing, Chiang Mai, Thailand. November 22 - 26, 2004.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction.** San Diego, California: Academic Press, 1995. 467 p.

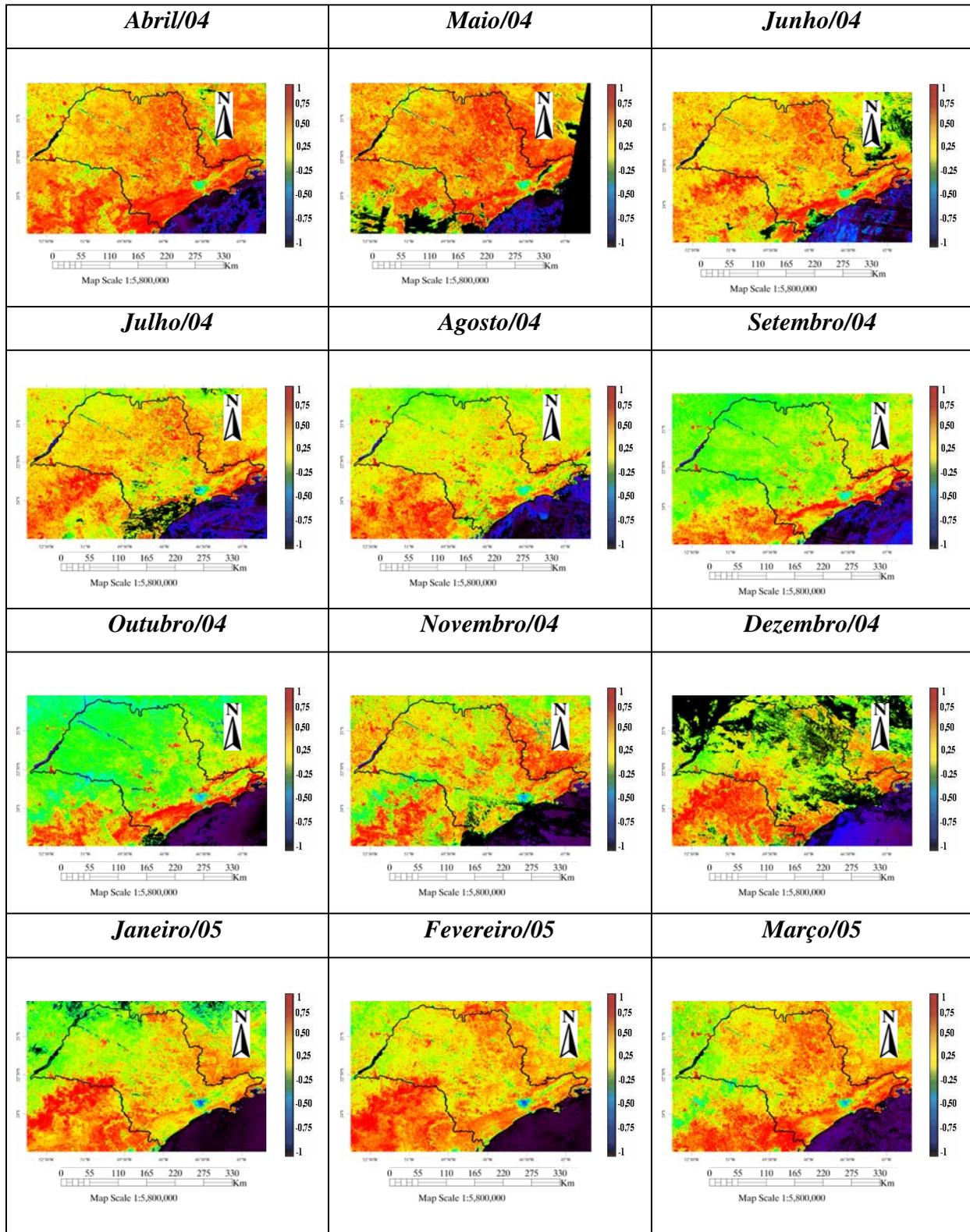
YIN, Z.; WILLIAMS, T.H.L. Obtaining spatial and temporal vegetation data from Landsat MSS and AVHRR/NOAA satellites images for a hydrologic model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.63, p.69-77, 1997.

## 7. ANEXOS

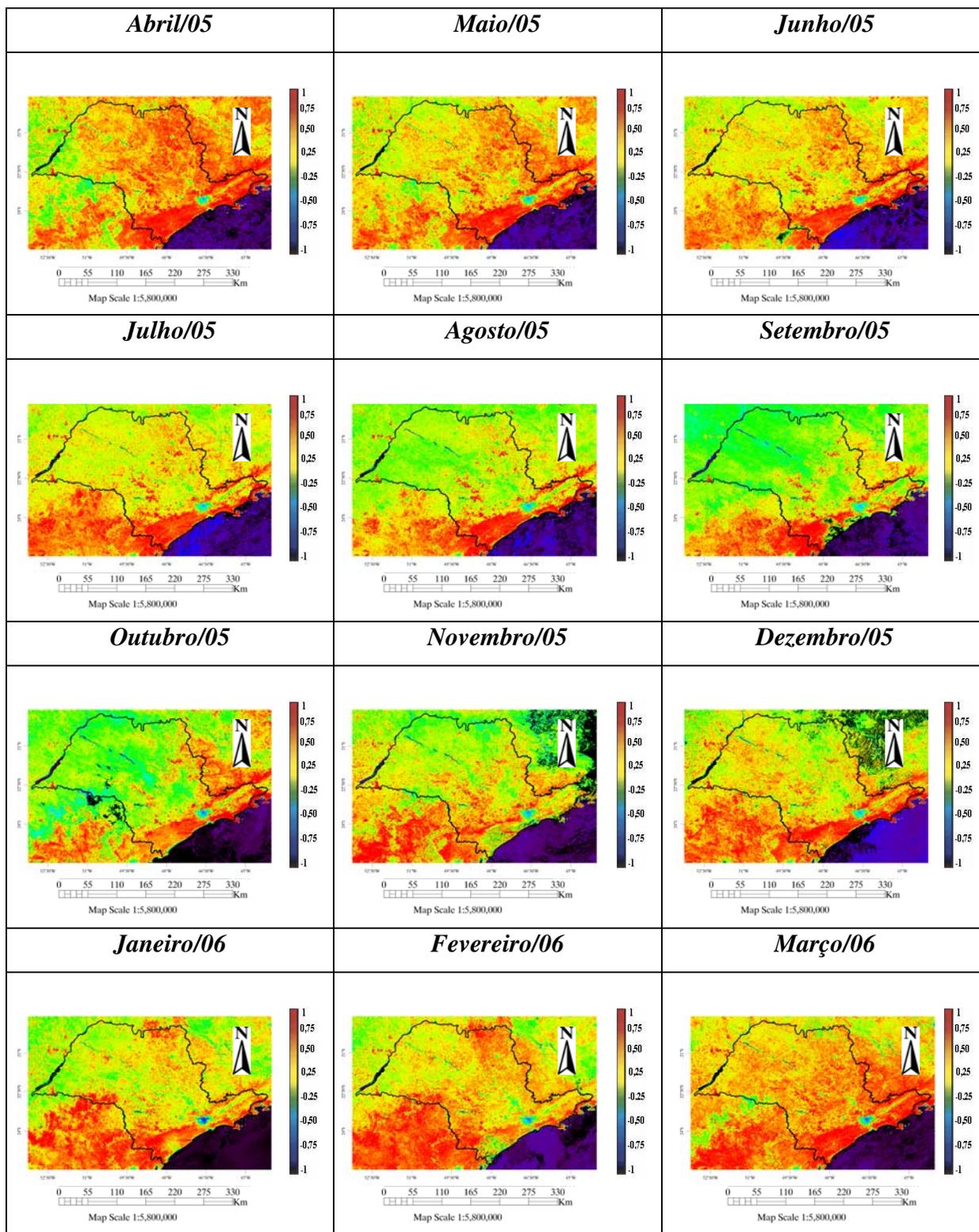
### 7.1 Composições NDVI/MVC: Safra 03/04



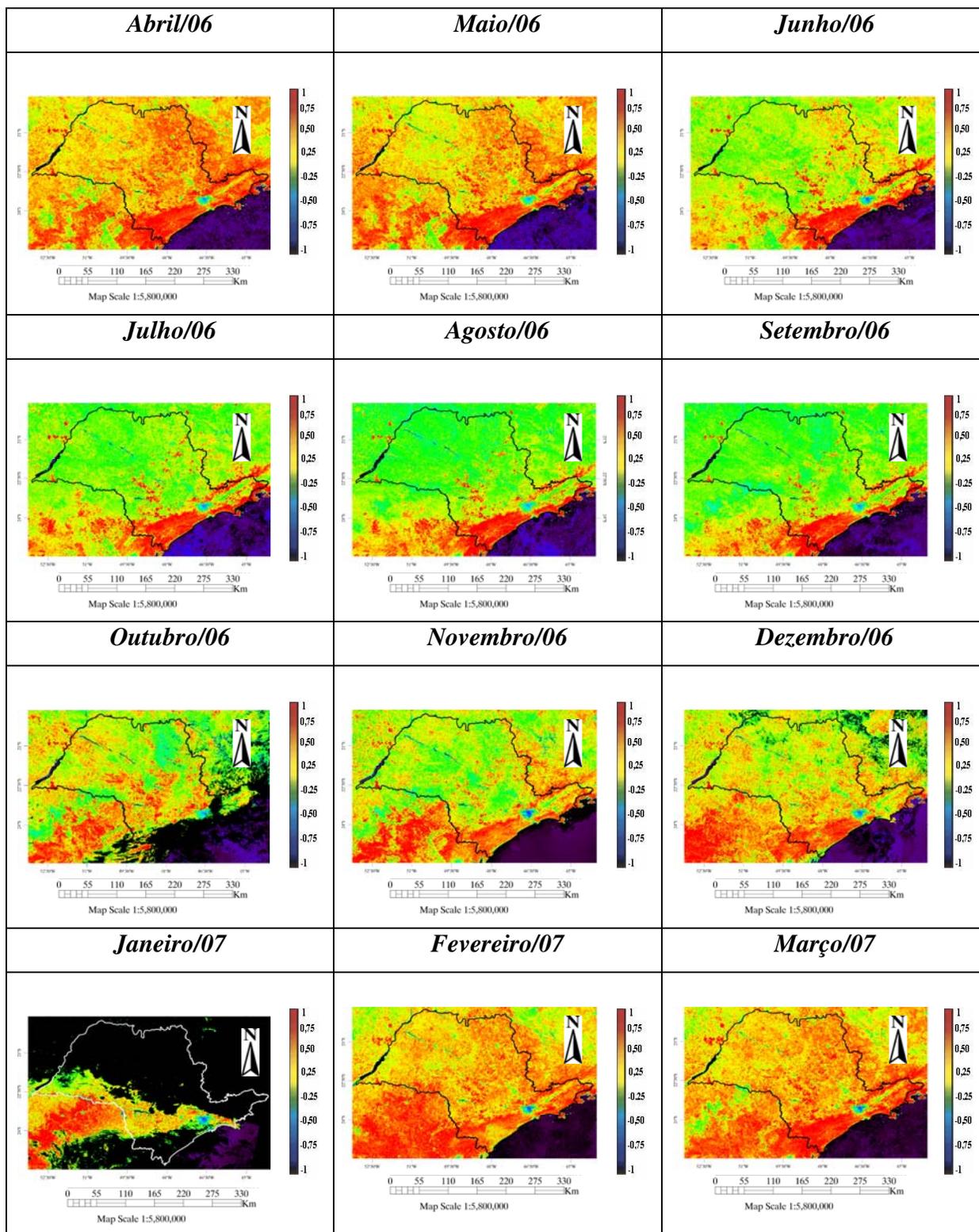
## 7.2 Composições NDVI/MVC: Safra 04/05



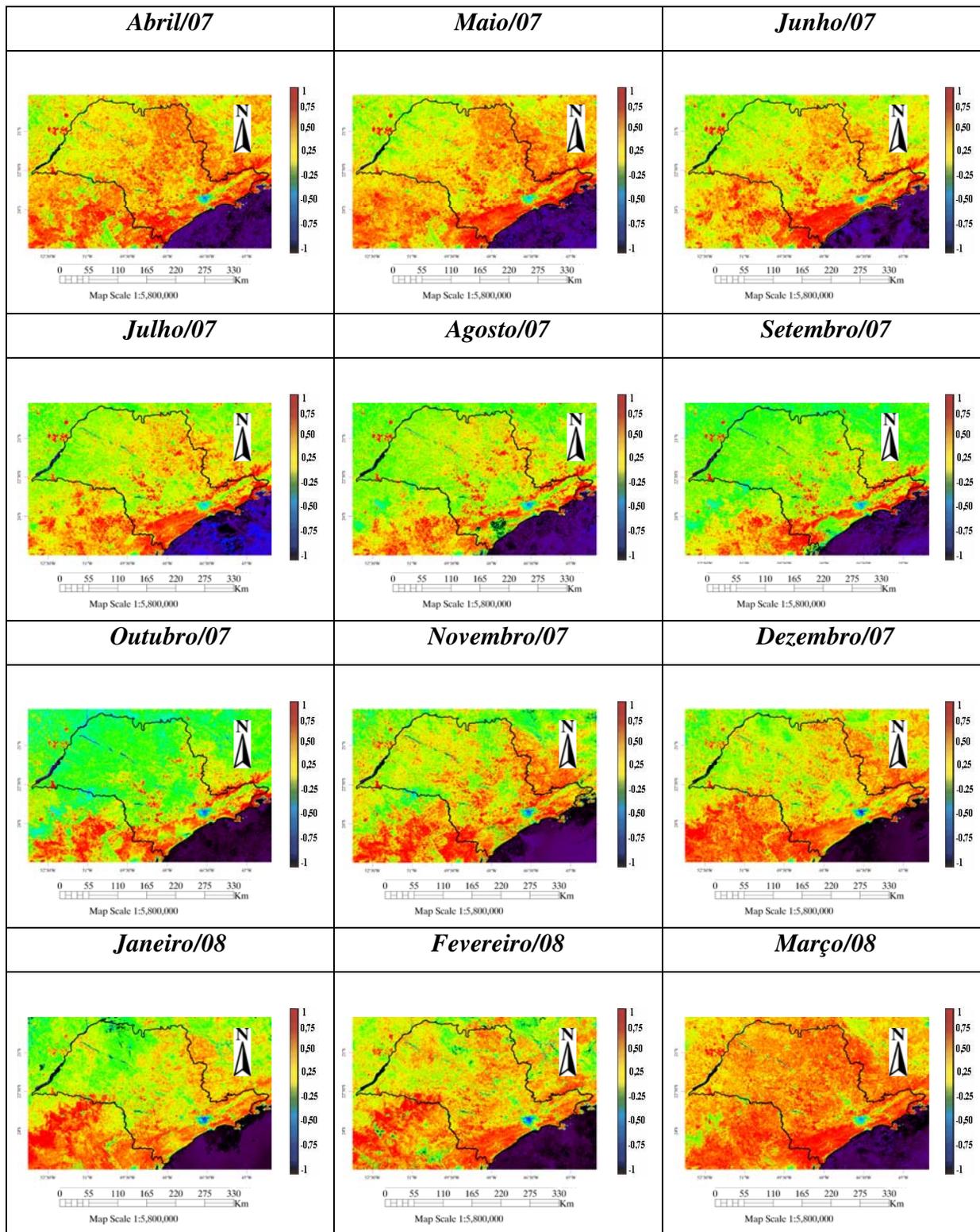
### 7.3 Composições NDVI/MVC: Safra 05/06



### 7.4 Composições NDVI/MVC: Safra 06/07

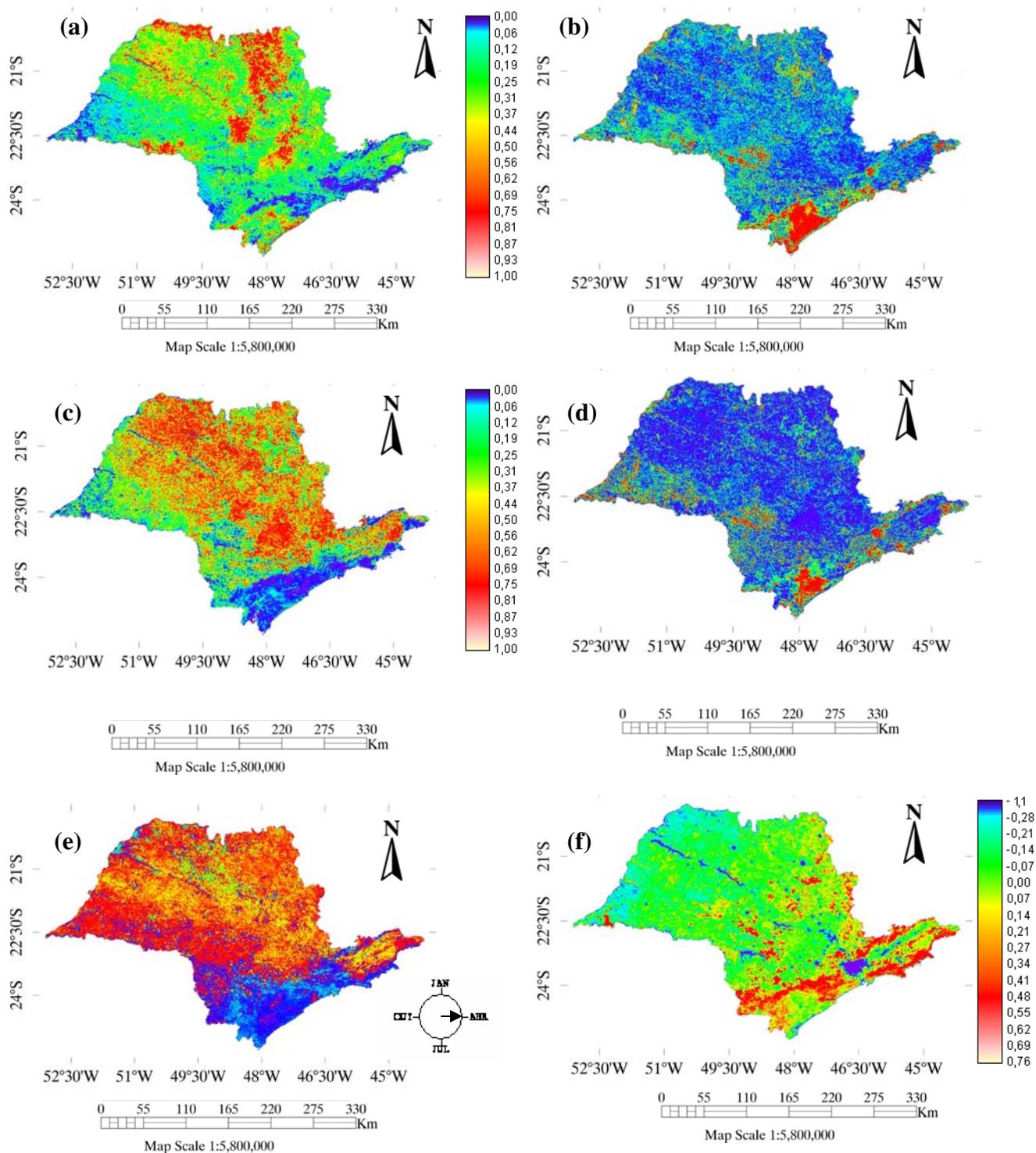


7.5 Composições NDVI/MVC: Safra 07/08



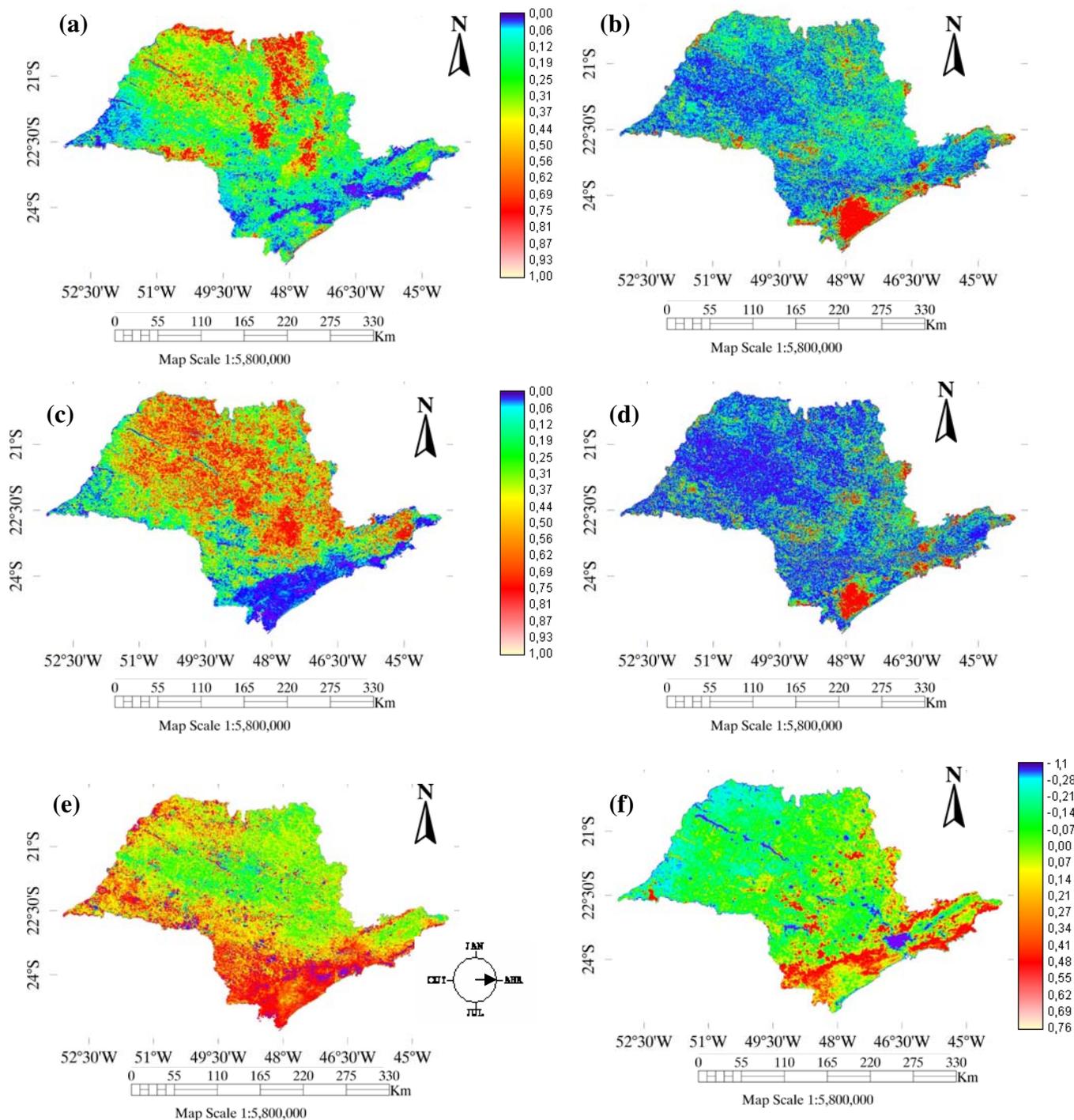


7.7 *Imagens dos termos harmônicos: Safra 04/05*



**Figura 68. Imagens dos termos harmônicos da safra 04/05, representando: Imagens Amplitude - 1°harmonico (a), amplitude - 2° harmônico, variância - 1°harmonico (c), variância - 2° harmônico (d), ângulo fase (e) e termo aditivo (f).**

## 7.8 *Imagens dos termos harmônicos: Safra 05/06*



**Figura 69.** Imagens dos termos harmônicos da safra 05/06, representando: Imagens Amplitude - 1° harmônico (a), amplitude - 2° harmônico, variância - 1° harmônico (c), variância - 2° harmônico (d), ângulo fase (e) e termo aditivo (f)

7.9 *Imagens dos termos harmônicos: Safra 06/07*

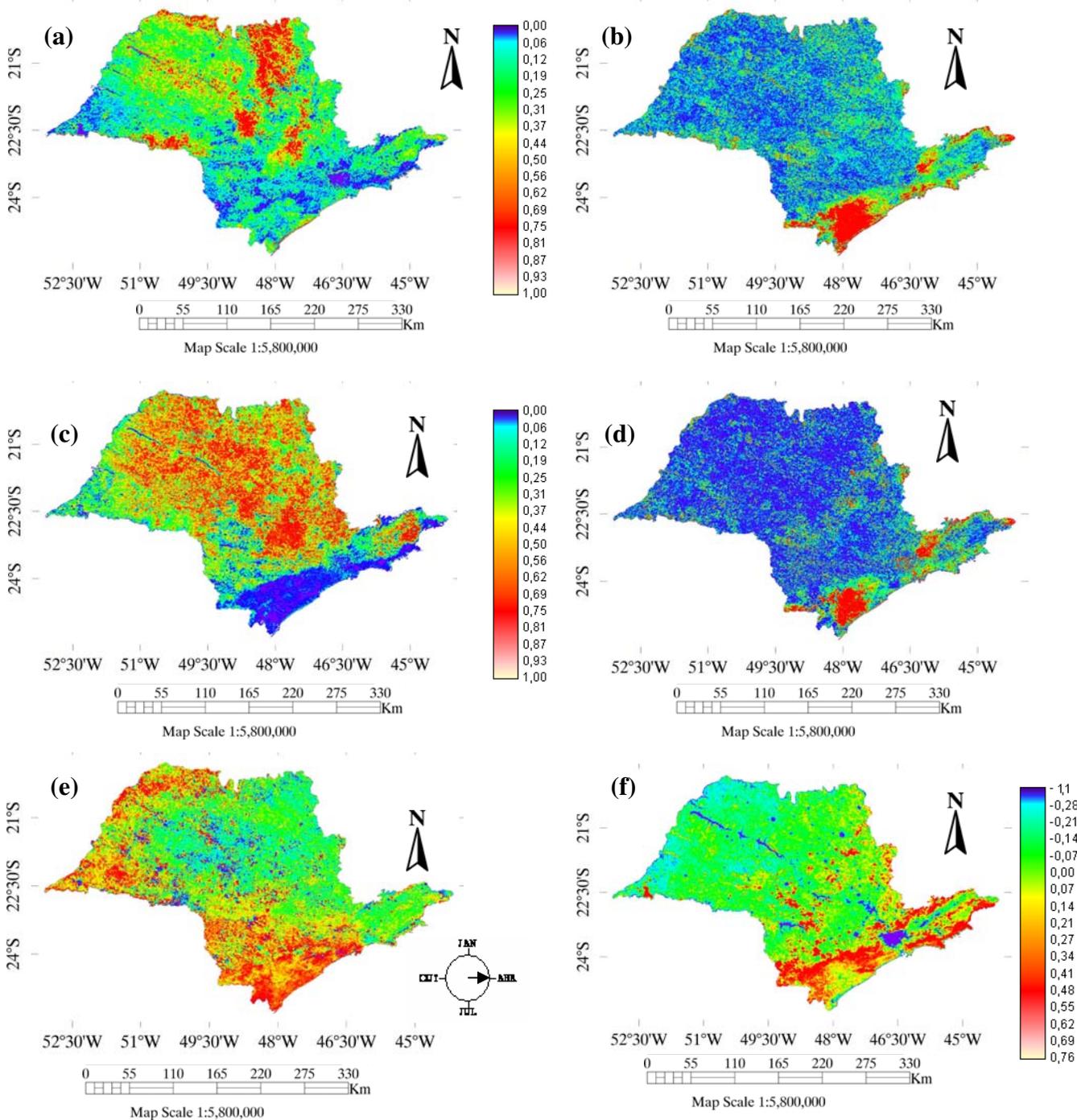
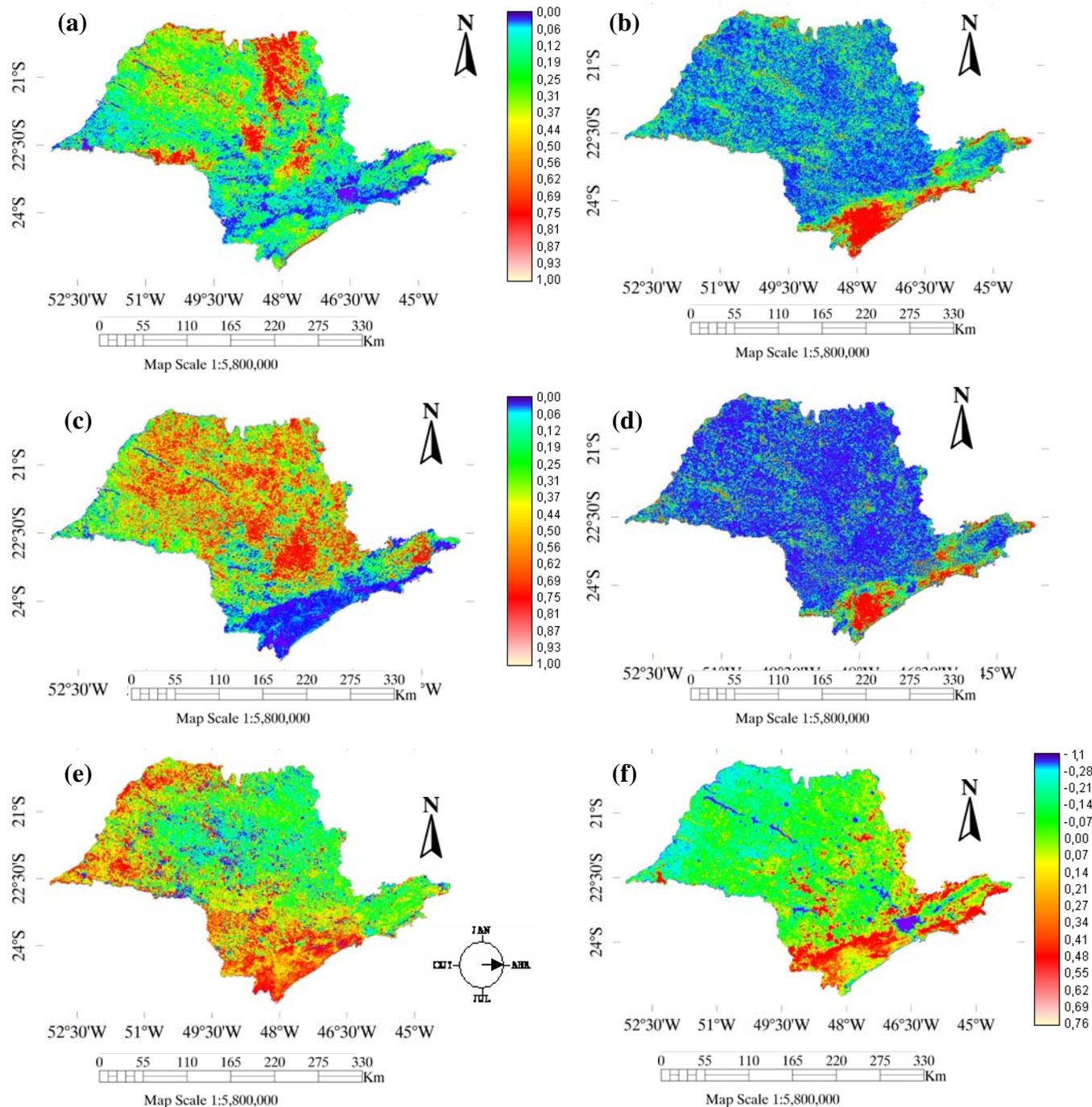


Figura 70. Imagens dos termos harmônicos da safra 06/07, representando: Imagens Amplitude - 1° harmônico (a), amplitude - 2° harmônico, variância - 1° harmônico (c), variância - 2° harmônico (d), ângulo fase (e) e termo aditivo (f).

7.10 *Imagens dos termos harmônicos: Safra 07/08*



**Figura 71. Imagens dos termos harmônicos da safra 07/08, representando: Imagens Amplitude - 1<sup>o</sup> harmônico (a), amplitude - 2<sup>o</sup> harmônico, variância - 1<sup>o</sup> harmônico (c), variância - 2<sup>o</sup> harmônico (d), ângulo fase (e) e termo aditivo (f).**