

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DE PERFIS MULTI-TEMPORAIS DO
NDVI/AVHRR NO ACOMPANHAMENTO DA SAFRA DE SOJA
NO OESTE DO PARANÁ**

JÚLIO CÉSAR DALLA MORA ESQUERDO

CAMPINAS – SP
FEVEREIRO DE 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**UTILIZAÇÃO DE PERFIS MULTI-TEMPORAIS DO
NDVI/AVHRR NO ACOMPANHAMENTO DA SAFRA DE SOJA
NO OESTE DO PARANÁ**

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

AUTOR: JÚLIO CÉSAR DALLA MORA ESQUERDO

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Zullo Júnior.

CAMPINAS – SP
FEVEREIRO DE 2007

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

Es58u Esquerdo, Júlio César Dalla Mora
Utilização de perfis multi-temporais do
NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no
oeste do Paraná / Júlio César Dalla Mora Esquerdo.--
Campinas, SP: [s.n.], 2007.

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

1. Sensoriamento remoto. 2. Agricultura – Estimativa
de rendimento. 3. Sistema de informação geográfica. 4.
Soja. 5. Processamento de imagens. I. Zullo Júnior,
Jurandir. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Use of NDVI/AVHRR time-series profiles for soybean crop
monitoring in the west of Paraná, Brazil

Palavras-chave em Inglês: Geoprocessing, Remote sensing, Multitemporal
analysis, Crop yield forecasting, Geometric correction,
Image processing

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Flávio André Cecchini Deppe, Giampaolo Queiroz
Pellegrino, Mara de Andrade Marinho Weill, Jansle Vieira
Rocha e Angélica Giarola Picini

Data da defesa: 16/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde a redação final da Tese de Doutorado defendida por **Júlio César Dalla Mora Esquerdo**, aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de Fevereiro de 2007, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof. Dr. Jurandir Zullo Júnior – Presidente
CEPAGRI/UNICAMP

Dr. Flávio André Cecchini Deppe
SIMEPAR

Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino
EMBRAPA Informática Agropecuária

Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha
FEAGRI/UNICAMP

Prof^a. Dr^a. Mara de Andrade Marinho Weill
FEAGRI/UNICAMP

Dr^a. Angélica Giarola Picini
CPTEC/INPE

*Aos meus pais, José Antonio e Elisa,
por seus estímulos constantes,
por seus esforços,
por seus exemplos.*

Ofereço.

À minha avó, Olga,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir dar mais este passo.

À Faculdade de Engenharia Agrícola e à Universidade Estadual de Campinas pela oportunidade de aprendizado e pela bolsa fornecida durante a participação no Programa de Instrutores Graduados.

Ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, pela infra-estrutura disponibilizada.

Ao Professor Dr. Jurandir Zullo Júnior, pela orientação, aprendizado e incentivos ao longo do trabalho.

Ao Professor Dr. Jansle Vieira Rocha, pela utilização da infra-estrutura do Laboratório de Geoprocessamento, pelas sugestões ao trabalho e pelo estímulo às atividades docentes.

Ao Dr. Flávio Jorge Ponzoni, pelas contribuições ao trabalho e pela oportunidade de aprendizado durante as campanhas em Barreiras. E ao Dr. José Renato Bouças Farias, pelas sugestões no exame de qualificação.

Aos pesquisadores, Dr. Flávio André Cecchini Deppe, Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino e Dr^a. Angélica Giarola Picini, pela participação na banca de defesa e pelas sugestões que contribuíram para a melhoria do trabalho.

À Professora Dr^a. Mara de Andrade Marinho Weill, pelos incentivos no programa de instrutores graduados e por sua participação na banca de defesa. E ao Professor Dr. Rubens Lamparelli pelo aprendizado e convívio.

À Vanilde, pelo seu carinho, apoio e paciência nos momentos difíceis.

Ao meu sobrinho Thiago, pela sua vinda.

Aos meus amigos João Francisco Gonçalves Antunes, pela parceria no desenvolvimento do sistema de processamento das imagens NOAA, e Erivelto Mercante, pelas discussões sobre nossos problemas em comum envolvendo a cultura da soja. E, sobretudo, pelo convívio, amizade e aprendizado.

Às amigas Ana Heuminski de Ávila e Gláucia Miranda Ramirez, pelo companherismo e pela convivência.

Aos demais amigos de turma, pela amizade, pelo convívio e aprendizado, agradeço: Bernadete Pedreira, Claudia Bloisi, Daniela Oliveira, Guilherme Cerri, Hermógenes Machado,

Leonardo Sene, Liane Weber, Lúcia Bertolo, Luis Antonio Nery, Pedro Pontes, Rojane Kletecke e Wander Pallone.

Aos amigos do CEPAGRI, Edilene Carneiro, Claudir Rodriguez, Gustavo Coral e Rosana Fagundes, pelo auxílio dispensado em vários momentos.

Aos Doutores Daniel G. Baldwin e William Emery, do *Colorado Center of Astrodynamics Research* (CCAR), da Universidade do Colorado, por repassarem a tecnologia de software para o processamento das imagens AVHRR-NOAA.

Aos técnicos da FEAGRI, Agmon Moreira Rocha e André Nogueira, pelo suporte computacional.

Agradeço à Ana Paula Montagner, em nome dos demais integrantes da Coordenadoria de Pós-Graduação da FEAGRI, pelo auxílio e atendimento prestados em inúmeros momentos.

À FINEP, PNUD e CAPES, pelas bolsas concedidas em diferentes momentos do curso.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por ceder parte das imagens Landsat utilizadas neste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE TABELAS..... | xiii |
| LISTA DE TABELAS..... | xiii |
| RESUMO | xv |
| ABSTRACT | xvi |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1. A cultura da soja no Brasil | 4 |
| 2.1.1. O ciclo da soja | 6 |
| 2.1.2. Exigências hídricas e térmicas da soja | 7 |
| 2.2. A previsão de safras | 8 |
| 2.3. O sensoriamento remoto orbital e sua aplicação na agricultura..... | 10 |
| 2.3.1. Comportamento espectral da vegetação | 11 |
| 2.3.2. Índices de vegetação..... | 13 |
| 2.3.3. Uso de imagens multi-temporais no estudo da vegetação..... | 18 |
| 2.3.4. Os satélites NOAA e o sensor AVHRR/3 | 19 |
| 2.4. O processamento das imagens AVHRR/NOAA | 21 |
| 2.4.1. A calibração radiométrica | 22 |
| 2.4.2. A correção geométrica das imagens NOAA | 22 |
| 2.4.3. A correção atmosférica..... | 26 |
| 2.4.4. Composições de valor máximo | 27 |
| 2.5. Aplicações de imagens AVHRR/NOAA na agricultura | 29 |
| 2.5.1. Correlação de dados espectrais AVHRR com a produtividade das culturas..... | 29 |
| 2.5.2. Monitoramento de culturas com imagens AVHRR/NOAA..... | 32 |
| 2.5.3. Discriminação do uso do solo com imagens AVHRR/NOAA | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 36 |
| 3.1. Material | 36 |
| 3.1.1. Caracterização da área de estudo | 36 |
| 3.1.2. Imagens AVHRR/NOAA..... | 37 |
| 3.1.3. Imagens de média resolução espacial..... | 38 |
| 3.1.4. Dados estatísticos de produtividade da soja dos municípios estudados e dados meteorológicos | 39 |
| 3.1.5. Recursos computacionais para o processamento, visualização e tratamento dos dados e imagens | 41 |
| 3.2. Métodos..... | 42 |
| 3.2.1. Sistema automático de processamento das imagens AVHRR/NOAA..... | 43 |
| 3.2.1.1. Conversão do formato bruto e correção de linhas faltantes | 43 |
| 3.2.1.2. Conversão radiométrica..... | 45 |
| 3.2.1.3. Georreferenciamento das imagens | 47 |
| 3.2.1.4. Geração de produtos AVHRR/NOAA | 49 |
| 3.2.2. Sistema para geração automática dos perfis temporais de NDVI | 52 |
| 3.2.2.1. Determinação das áreas de soja..... | 53 |
| 3.2.2.2. Funcionamento do sistema para geração automática dos perfis | 55 |
| 3.2.3. Correlação entre NDVI x produtividade oficial de soja..... | 57 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 59 |
| 4.1. O sistema para processamento das imagens AVHRR/NOAA | 59 |
| 4.2. O sistema para geração automática dos perfis temporais de NDVI..... | 67 |
| 4.3. Monitoramento da cultura da soja e as análises da correlação entre NDVI x produtividade nas três safras..... | 69 |
| 4.3.1. Safra 2002/2003 | 71 |
| 4.3.2. Safra 2003/2004 | 80 |
| 4.3.3. Safra 2004/2005 | 89 |
| 4.3.4. Verificação das condições climáticas nas três safras | 97 |
| 4.3.5. Comparação e discussão das correlações obtidas nas três safras | 102 |
| 4.4. Considerações finais e sugestões..... | 108 |

| | |
|--|------------|
| 5. CONCLUSÕES | 112 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 114 |
| 7. APÊNDICES..... | 126 |
| 7.1. Apêndice 1 – Script <i>c-shell</i> desenvolvido para acionar os módulos do NAV | 126 |
| 7.2. Apêndice 2 – Rotina IDL principal para geração dos produtos (mod_nav)..... | 134 |
| 7.3. Apêndice 3 – Rotina IDL para leitura do cabeçalho das imagens (mod_cab) | 140 |
| 7.4. Apêndice 4 – Rotina IDL para leitura dos dados calibrados (mod_cal) | 142 |
| 7.5. Apêndice 5 – Rotina IDL para geração da máscara de nuvens (mod_nuv) | 146 |
| 7.6. Apêndice 6 – Rotina IDL para cálculo do NDVI (mod_ndvi)..... | 147 |
| 7.7. Apêndice 7 – Rotina IDL para cálculo do NDMI (mod_ndmi) | 148 |
| 7.8. Apêndice 8 – Rotina IDL para geração de figuras JPEG (mod_fig)..... | 149 |
| 7.9. Apêndice 9 – Rotina IDL para a geração das composições de máximo valor | 152 |
| 7.10. Apêndice 10 – Rotina IDL para a geração automática dos perfis temporais de NDVI | |
| | 154 |
| 8. ANEXOS | 166 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Evolução da produção de soja nos estados brasileiros. | 5 |
| Figura 2. | Estádios de desenvolvimento da cultura da soja. | 6 |
| Figura 3. | Zoneamento do risco climático para plantio da soja no Estado do Paraná, em diferentes épocas de semeadura. | 8 |
| Figura 4. | Assinatura espectral de uma folha de soja. | 12 |
| Figura 5. | Representação esquemática da evolução da reflectância de uma cobertura vegetal ao longo das fases de crescimento e senescência. | 13 |
| Figura 6. | Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o NDVI, considerando dados de três sensores orbitais. | 16 |
| Figura 7. | Comportamento do NDVI de uma vegetação sadia (esquerda) e não sadia ou em senescência (direita). | 17 |
| Figura 8. | Diagrama ilustrando os parâmetros derivados de um perfil temporal de NDVI. | 19 |
| Figura 9. | Os três ângulos de movimentação de uma plataforma orbital. | 24 |
| Figura 10. | Elaboração de uma composição de máximo valor a partir de dados diários. | 28 |
| Figura 11. | Estado do Paraná e os municípios cobertos pela cena Landsat 223/77. | 36 |
| Figura 12. | Caracterização dos solos na região coberta pela cena Landsat 223/77. | 37 |
| Figura 13. | Composição colorida falsa cor RGB-453 da cena Landsat 5/TM 223/77 do dia 07/12/2003. | 38 |
| Figura 14. | Área colhida de soja nos municípios do Estado do Paraná, nas três safras analisadas. | 40 |
| Figura 15. | Produção de soja nos municípios do Estado do Paraná, nas três safras analisadas. | 40 |
| Figura 16. | Produtividade de soja nos municípios do Estado do Paraná, nas três safras analisadas. | 41 |
| Figura 17. | Fluxograma do sistema para monitoramento regional da cultura da soja. | 42 |
| Figura 18. | Fluxograma do sistema automático de processamento das imagens NOAA. | 44 |
| Figura 19. | Método da MCC aplicado em duas imagens. | 48 |
| Figura 20. | Esquematização das rotinas IDL desenvolvidas para geração dos arquivos de saída. | 51 |
| Figura 21. | Máscara de soja da safra 2003/2004 (cena Landsat-5 223/77). | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Efeitos da filtragem e reamostragem da máscara de soja para a seleção dos pixels com menor mistura espectral..... | 55 |
| Figura 23. Fluxograma da rotina para geração dos perfis de NDVI..... | 56 |
| Figura 24. Georreferenciamento antes e depois da correção dos erros de atitude do satélite..... | 62 |
| Figura 25. Histograma de freqüências do deslocamento das 209 imagens nível G1 e sua porcentagem cumulativa..... | 63 |
| Figura 26. Composição falsa cor RGB-321 do dia 29/03/2005..... | 64 |
| Figura 27. Máscara de nuvens do dia 29/03/2005. | 65 |
| Figura 28. Imagem NDVI do dia 29/03/2005, com pixels inaptos mascarados. | 65 |
| Figura 29. Imagem NDMI do dia 29/03/2005, com pixels inaptos mascarados. | 66 |
| Figura 30. Saída gráfica do perfil temporal do NDVI no município de Assis Chateaubriand, na safra 03/04 (alterada com informações sobre a fenologia da soja). | 68 |
| Figura 31. Perfis temporais antes (a) e após (b) a correção das variações incoerentes do NDVI no município de Janiópolis na safra 2004/2005. | 69 |
| Figura 32. Municípios da cena Landsat 223/77 que se adequaram aos requisitos para o monitoramento da soja ao nível NOAA. | 70 |
| Figura 33. Composições máximas quinzenais de NDVI geradas pelo sensor AVHRR/3 na safra 2002/2003..... | 72 |
| Figura 34. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2002/2003 nos municípios de Assis Chateaubriand à Quarto Centenário..... | 74 |
| Figura 35. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2002/2003 nos municípios de Toledo à Ubatuba. | 75 |
| Figura 36. Perfis temporais médios do NDVI nos 18 municípios analisados na safra 2002/2003.. | 75 |
| Figura 37. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2002/2003, em cada um dos seis períodos analisados. | 80 |
| Figura 38. Composições máximas quinzenais de NDVI geradas pelo sensor AVHRR/3 na safra 2003/2004..... | 81 |
| Figura 39. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2003/2004 nos municípios de Assis Chateaubriand à Corbélia. | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 40. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2003/2004 nos municípios de Goioerê à Ubiratã. | 83 |
| Figura 41. Perfis temporais médios do NDVI nos 18 municípios analisados na safra 2003/2004. | 84 |
| Figura 42. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2003/2004, em cada um dos seis períodos analisados. | 88 |
| Figura 43. Composições máximas quinzenais de NDVI geradas pelo sensor AVHRR/3 na safra 2004/2005. | 90 |
| Figura 44. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2004/2005 nos municípios de Assis Chateaubriand à Quarto Centenário. | 91 |
| Figura 45. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2004/2005 nos municípios de Toledo à Ubiratã. | 92 |
| Figura 46. Perfis temporais médios do NDVI nos 18 municípios analisados na safra 2004/2005. | 92 |
| Figura 47. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2004/2005 nos períodos analisados 1 e 2. | 96 |
| Figura 48. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2004/2005, nos períodos analisados 3 a 6. | 97 |
| Figura 49. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b, c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Assis Chateaubriand. | 99 |
| Figura 50. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b, c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Cascavel. | 99 |
| Figura 51. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b, c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Campo Mourão. | 100 |
| Figura 52. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b e c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Toledo. | 100 |
| Figura 53. Produtividade normalizada da soja nas três safras, gerada por simulação de modelo agrometeorológico de penalização. | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 54. Comparação dos perfis temporais médios de NDVI das safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 nos municípios de Assis Chateaubriand à Janiópolis..... | 103 |
| Figura 55. Comparação dos perfis temporais médios de NDVI das safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 nos municípios de Jurandá à Toledo. | 104 |
| Figura 56. Comparação dos perfis temporais médios de NDVI das safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 nos municípios de Tupãssi e Ubatã..... | 105 |
| Figura 57. Gráficos das melhores correlações obtidas com dados das safras 2002/2003 e 2004/2005..... | 107 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 1. | Estádios de desenvolvimento da cultura da soja. | 7 |
| Tabela 2. | Exemplos índices de vegetação encontrados na literatura. | 15 |
| Tabela 3. | Sensores de órbita polar com elevada resolução temporal. | 18 |
| Tabela 4. | Características do sensor AVHRR/3. | 21 |
| Tabela 5. | Cenas Landsat utilizadas na geração das máscaras de soja. | 39 |
| Tabela 6. | Características espectrais e espaciais do sensor TM e ETM+. | 39 |
| Tabela 7. | Descrição dos arquivos gerados pelo sistema de processamento das imagens NOAA.. | 53 |
| Tabela 8. | Número de imagens brutas utilizadas em cada uma das safras e os níveis de processamento obtidos. | 60 |
| Tabela 9. | Produtividade média da soja nos municípios monitorados, durante as safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005. | 71 |
| Tabela 10. | Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2002/2003, nos períodos 1, 2 e 3. | 77 |
| Tabela 11. | Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2002/2003, nos períodos 4, 5 e 6. | 78 |
| Tabela 12. | Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja na safra 2002/2003. | 79 |
| Tabela 13. | Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2003/2004, nos períodos 1, 2 e 3. | 85 |
| Tabela 14. | Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2003/2004, nos períodos 4, 5 e 6. | 86 |
| Tabela 15. | Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja na safra 2003/2004. | 87 |
| Tabela 16. | Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2004/2005, nos períodos 1, 2 e 3. | 94 |
| Tabela 17. | Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2004/2005, nos períodos 4, 5 e 6. | 95 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 18. Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja na safra 2004/2005. | 96 |
| Tabela 19. Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja utilizando os dados das safras 2002/2003 e 2003/2004. | 106 |

RESUMO

Sistemas de previsão de safras são fontes importantes de informações, capazes de auxiliar Governo e instituições privadas nas questões relativas à comercialização agrícola. Os métodos tradicionais de previsão de safras nem sempre resultam em estimativas precisas, em função de seu caráter subjetivo. Soluções na área das Geotecnologias têm sido estudadas para o desenvolvimento de sistemas de previsão de safras mais eficientes. Neste trabalho, foram utilizadas imagens multi-temporais do índice de vegetação NDVI, derivado de imagens AVHRR/NOAA, para o monitoramento da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na região oeste do estado do Paraná, ao longo dos anos-safra 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005. Imagens Landsat foram processadas para determinação das áreas de soja a serem monitoradas. Perfis temporais, descrevendo a condição da biomassa da cultura ao longo do ciclo fenológico, foram gerados em 18 municípios produtores. Sistemas automáticos de processamento de imagens e de extração das informações espectrais foram desenvolvidos para a formação da infra-estrutura necessária ao trabalho. Parâmetros quantitativos foram extraídos dos perfis temporais, considerando o ciclo produtivo completo ou parcial. Regressões lineares entre os parâmetros quantitativos e a produtividade média municipal mostraram que, nos anos-safra 2002/2003 e 2003/2004, as correlações mais significativas ocorreram quando considerado o ciclo completo. Ao considerar partes menores dos perfis, em períodos que antecederam o término da safra, as correlações mostraram uma tendência de queda. O monitoramento do NDVI nestes dois anos-safra, que apresentaram condições climáticas distintas, pôde explicar grande parte da variabilidade da produtividade da soja, em nível municipal. As correlações na safra 2004/2005 apresentaram uma tendência inversa, sendo mais significativas dois meses antes da colheita. Os resultados mostraram o potencial da análise multi-temporal do NDVI na geração de parâmetros a serem inseridos em modelos agrometeorológico-espectrais, para a estimativa da produtividade da soja. A infra-estrutura desenvolvida neste trabalho permitiu maior automação da análise multi-temporal, principalmente na etapa do georreferenciamento preciso das imagens NOAA, que não demandou intervenção humana.

Palavras-chave: geoprocessamento, sensoriamento remoto, análise multi-temporal, estimativa de safras, correção geométrica, processamento de imagens.

USE OF NDVI/AVHRR TIME-SERIES PROFILES FOR SOYBEAN CROP MONITORING IN THE WEST OF PARANÁ, BRAZIL

ABSTRACT

Crop yield forecasting systems are important sources of information for helping Government and private institutions in agricultural trade matters. The traditional methods of crop yield forecasting normally do not provide precise estimations, due to its subjectivity. The use of Geotechnology has been studied for the development of more efficient crop yield forecasting systems. In this study, NDVI time-series, obtained from AVHRR/NOAA imagery, were used for the soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) crop monitoring in the western region of the Paraná State, Brazil, in the 2002/2003, 2003/2004 and 2004/2005 cropping seasons. Landsat images were processed to identify the soybean crop lands. Temporal profiles, describing the biomass status throughout the phenological cycle, were generated for 18 municipal districts. Automatic systems for image processing and spectral information extracting were developed to speed up the study. Quantitative parameters were measured from the temporal profiles, considering the whole cycle and parts of it. Linear regressions between the quantitative parameters and the municipal mean yields have shown that, in the 2002/2003 and 2003/2004 cropping seasons, the most significant correlations occurred when the whole cycle was considered. When smaller periods of the cycle were considered, prior to harvest, the correlations lowered. The NDVI monitoring during these two cropping years, which presented different climatic conditions, allowed the explanation of a greater part of the soybean yield variability at the municipal level. Inverse correlations were obtained in the 2004/2005 season, with more significant coefficients two months prior to harvest. The results have shown the potential of the multitemporal analysis using NDVI profiles as a source of data to be added to agrometeorological-spectral models for the soybean yield forecasting. The infrastructure presented in this study allowed a higher level of automation in the multitemporal analysis, mainly in the precise NOAA image navigation, which did not demand human intervention.

Keywords: geoprocessing, remote sensing, multitemporal analysis, crop yield forecasting, geometric correction, image processing.

1. INTRODUÇÃO

Pela grande importância econômica da agricultura no país, os sistemas de previsão de safras são fundamentais para a determinação de preços, manutenção de estoques reguladores e desenvolvimento de políticas agrícolas. Estimativas confiáveis de produção agrícola são ferramentas poderosas para orientar os produtores nas questões ligadas ao plantio, auxiliar as agroindústrias no setor operacional e de comercialização e indicar ao governo números confiáveis, que permitam sua intervenção para reduzir impactos negativos na economia ou aproveitar antecipadamente os benefícios de uma situação favorável. Além disso, previsões de safra conduzidas por agentes internos ao país apresentam-se como um mecanismo eficaz de proteção da produção nacional, pois geram um referencial capaz de impedir ou reduzir a ação especulativa causada por estimativas geradas por agentes externos, muitas vezes pertencentes a países concorrentes no mercado internacional.

No Brasil, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) são os órgãos oficiais de divulgação das estatísticas agrícolas no país. Há vários anos, os métodos utilizados por esses órgãos são baseados em entrevistas e amostragens, podendo apresentar subjetividade, lentidão na aquisição de informações e custos elevados. Programas de melhoria e aperfeiçoamento metodológico têm sido uma preocupação para aumentar a eficiência de seus sistemas, de modo a obter informações em tempo ágil e sob custos menores.

Novas metodologias têm sido propostas para aumentar a eficiência dos sistemas de previsão de safras. Entre elas, estão as Geotecnologias, definidas como ferramentas utilizadas para aquisição, processamento, interpretação e análise de dados espacialmente referenciados. Uma dessas ferramentas é o Sensoriamento Remoto Orbital, que permite maior rapidez na aquisição de informações de grandes áreas terrestres, a avaliação de áreas antes inacessíveis e a geração de informações com maior periodicidade, em relação aos levantamentos de campo, praticados pelos métodos tradicionais.

Neste contexto, as imagens de satélite têm sido uma fonte importante de informações para estudos dos agrossistemas, pois provêm a necessária visão temporal da superfície terrestre. Um sensor particularmente importante é o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo da série de satélites da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Ainda que concebido para fins meteorológicos, o sensor AVHRR apresenta

características que permitem sua utilização para estudos terrestres, numa resolução espacial variando de um a quatro quilômetros. Embora já estejam disponíveis sensores de maior qualidade espacial, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS, 250 m) a bordo das plataformas Aqua e Terra e o *Wide Field Imager* (WFI, 260 m), a bordo do CBERS-2 (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), as imagens AVHRR/NOAA continuam sendo de grande uso em estudos envolvendo a análise de ecossistemas, em função da disponibilidade de longas séries temporais de imagens pelo grande acervo histórico de dados NOAA no mundo todo.

A despeito de sua menor resolução espacial, as imagens AVHRR/NOAA possuem características interessantes no estudo de alvos agrícolas. Sua alta resolução temporal, garantia de cobertura global e gratuidade das imagens lhe conferem um grande potencial para aplicações de monitoramento agrícola, que normalmente envolvem superfícies extensas e de elevada dinâmica espectral.

Um produto das imagens de satélite é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), amplamente utilizado ao longo de vários anos, e que apresenta correlação com o índice de área foliar e a biomassa da vegetação, sendo um bom estimador desses parâmetros. A disponibilidade de dados orbitais diários permite a aquisição periódica do NDVI, podendo-se gerar perfis temporais desse índice para cada local, descrevendo a condição de biomassa ao longo de todo o ciclo fenológico. A construção dos perfis temporais do NDVI e sua quantificação podem gerar informações que permitam avaliar o potencial produtivo das lavouras, além de servirem como entradas em sistemas de previsão de safras.

Qualquer sistema regional de previsão de safras agrícolas requer a aquisição e análise de dados vindos de áreas extensas em um número elevado de municípios. Ao se propor os dados orbitais como entrada nesses sistemas, é necessário que exista um sistema eficiente de processamento de imagens, que alie precisão e automação no processo de geração de produtos, como o NDVI. Ao mesmo tempo, é fundamental que exista um nível de automação na extração dos dados espectrais dos produtos das imagens de sensoriamento remoto, reduzindo o máximo possível a intervenção humana nesses processos.

Assim, os objetivos propostos neste trabalho visaram verificar a seguinte hipótese: *O uso otimizado das geotecnologias permite operacionalizar a análise multi-temporal do NDVI, possibilitando o monitoramento de culturas agrícolas em nível municipal e a geração de informações para a alimentação de sistemas de previsão de safras.*

Para verificar esta hipótese, o trabalho apresentou dois passos principais. O primeiro deles foi o desenvolvimento de uma infra-estrutura de sistemas capaz de automatizar os processos de aquisição da informação espectral. Para isso, foi necessária a melhoria dos métodos de processamento e geração de produtos a partir de imagens AVHRR/NOAA, além do desenvolvimento de um sistema automático de extração dos dados espectrais das imagens.

O outro passo foi a análise das informações espectrais obtidas das imagens, sua relação com a produtividade das culturas, sua utilidade no monitoramento das lavouras e sua potencialidade na alimentação de sistemas de previsão de safras. Para tanto, optou-se pelo estudo da soja, que nos dias atuais é a cultura de maior expressão no agronegócio do país. A soja brasileira representa cerca de 27% do total comercializado no mundo, rendendo divisas importantes e contribuindo de forma positiva na balança comercial do país.

A região escolhida para o estudo foi a parte oeste do estado do Paraná, segundo maior produtor de soja do Brasil, responsável por quase 18% da produção nacional. Deste montante, cerca de 40% vêm das regiões oeste e centro-oeste do Paraná, cuja produtividade média apresenta alta correlação com a produtividade de todo o estado. A pesquisa se deu nos anos-safra 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005, entre os meses de outubro e abril, época de cultivo das principais culturas de verão nessa região.

Dessa forma, os objetivos específicos foram assim definidos:

- Aperfeiçoar as técnicas de processamento digital de imagens AVHRR/NOAA, buscando métodos de mínima ou nenhuma intervenção humana, principalmente na questão do georreferenciamento;
- Desenvolver um sistema automático para aquisição da informação espectral a partir de séries multi-temporais de imagens orbitais;
- Gerar perfis temporais de NDVI em municípios produtores de soja na região oeste do estado do Paraná, quantificá-los, e verificar sua correlação com dados de produtividade oficiais;
- Verificar a potencialidade de uso das informações extraídas dos perfis temporais de NDVI em sistemas de previsão da safra de soja.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da soja no Brasil

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das principais fontes de proteína e óleo vegetal do mundo, sendo cultivada comercialmente e utilizada nas alimentações humana e animal há centenas de anos. De acordo com evidências históricas e geográficas, a soja foi domesticada em 2500a.C. no nordeste da China (HYMOWITZ, 1970). No Brasil, foi possivelmente introduzida no estado da Bahia em 1882, a partir de estudos em estações agrônômicas experimentais. Entretanto, somente a partir da década de 40 na região Sul do Brasil, o cultivo da soja se tornou comercial no país. Atualmente, a cultura é considerada a mais importante *commodity* agropecuária brasileira, sendo um de seus principais produtos de exportação.

De acordo com um estudo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a expansão da cultura da soja, principalmente nas décadas de 70 e 80, contribuiu para uma série de mudanças no país, tendo sido em parte responsável pela aceleração da mecanização das lavouras brasileiras, modernização do sistema de transportes, expansão da fronteira agrícola, incremento do comércio internacional e impulso às agroindústrias brasileiras, deslançando a suinocultura e avicultura nacionais (EMBRAPA SOJA, 2003). A Figura 1 ilustra a evolução da soja nos estados brasileiros ao longo das últimas décadas.

Segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o Brasil é responsável por cerca de 35% das exportações mundiais de soja, o que o coloca no segundo lugar no ranking dos maiores exportadores, atrás somente dos Estados Unidos. O complexo agroindustrial presente no país favorece a produção de derivados com maior valor agregado, como óleo refinado, óleo bruto e farelo de soja. Entre os principais compradores dos produtos derivados da soja brasileira estão China, Holanda, França, Alemanha e Bélgica.

Atualmente, o Brasil é também o segundo maior produtor mundial de soja, alcançando na safra 2004/2005 a marca de 53,4 milhões de toneladas, de acordo com a CONAB. A soja agrega anualmente mais de 10 bilhões de dólares à balança comercial brasileira, assim como outros 50 bilhões de dólares que gera em benefícios indiretos representados, principalmente, por 4,5 milhões de empregos derivados da sua extensa cadeia produtiva que inclui a indústria de defensivos, fertilizantes, máquinas, assim como as empresas de transporte, armazenagem, processamento e exportação (DALL'AGNOL, 2006).

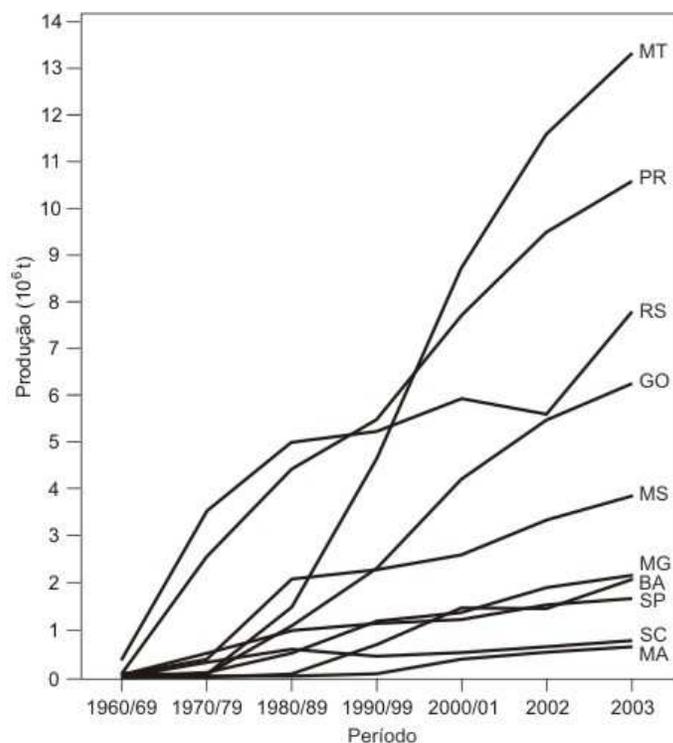


Figura 1. Evolução da produção de soja nos estados brasileiros.
 Fonte: EMBRAPA SOJA, 2003.

Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul são os estados com maior produção de soja atualmente. O Estado do Mato Grosso lidera a produção, tendo alcançado na safra 2005/2006 quase 16 milhões de toneladas de soja, ou 30% do total produzido no Brasil, segundo a CONAB. O Estado do Paraná é o segundo maior produtor, com 9,5 milhões de toneladas (ou 17,6% do total produzido no país).

Por sua importância para o país, a soja é alvo constante de pesquisas que visam principalmente o incremento da produtividade nas lavouras. Avaliando a expansão da cultura da soja nas últimas décadas, SANTOS (2000) relatou que de 1970 a 2000, a produção de 1,5 milhão de toneladas em 1,3 milhão de hectares passou a 31,7 milhões de toneladas em 13,5 milhões de hectares, o que ilustra o aumento da produtividade nas lavouras de soja brasileiras. Segundo o autor, durante a década de 90, o aumento da área plantada de soja foi, em média, de 1% ao ano, enquanto que a produção neste período aumentou 94%. Atualmente, a soja está sendo cultivada em quase todos os estados brasileiros, apresentando, em algumas regiões, rendimentos médios superiores aos obtidos pela soja norte-americana, principal concorrente no mercado internacional.

2.1.1. O ciclo da soja

De acordo com a duração de seu ciclo, os cultivares de soja podem ser classificados em precoce (75 a 115 dias), semiprecoce (116 a 125 dias), médio (126 a 137 dias), semitardio (138 a 150 dias) e tardio (acima de 150 dias), conforme FARIAS et al. (2000).

O ciclo da soja apresenta duas fases principais: o período vegetativo (V) e o reprodutivo (R). A fase vegetativa inicia-se com a emergência da plântula e termina com a abertura da primeira flor. A partir daí, inicia-se o período reprodutivo, que termina com a maturação da planta, conforme mostra a Figura 2.

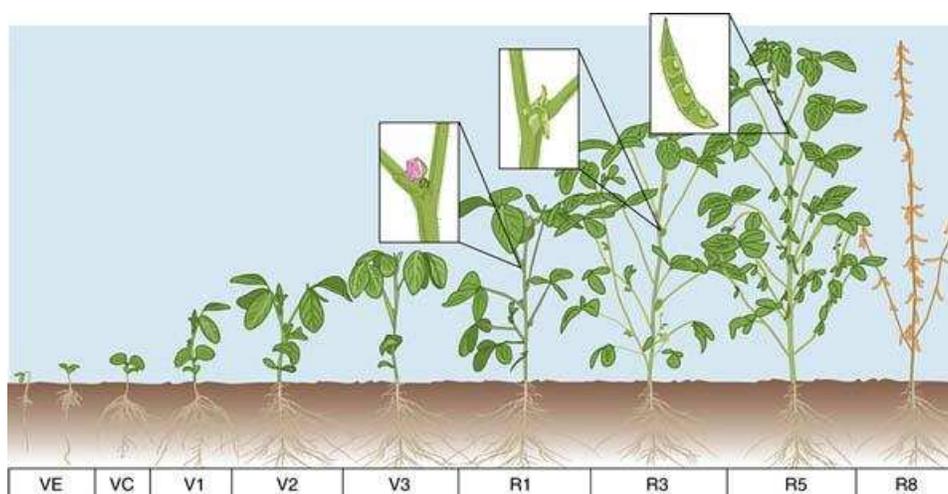


Figura 2. Estádios de desenvolvimento da cultura da soja.

Fonte: Adaptado de UNIVERSITY OF ILLINOIS EXTENSION (2006).

De acordo com FEHR e CAVINESS (1981), os períodos vegetativo e reprodutivo podem ser subdivididos, conforme mostra a Tabela 1. As subdivisões da fase vegetativa são designadas numericamente como V_1 , V_2 , V_3 , até V_n , com exceção dos dois primeiros estádios, que são designados como VE (emergência) e VC (estádio de cotilédones). O último estágio vegetativo é designado como V_n , onde “n” representa o número do último nó vegetativo formado por um cultivar específico. O valor de “n” varia em função das diferenças varietais e ambientais. Já a fase reprodutiva apresenta oito estádios, subdivididos em quatro partes: florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento da semente (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8).

Tabela 1. Estádios de desenvolvimento da cultura da soja.

| Estádios Vegetativos | Estádios Reprodutivos |
|-------------------------------|--|
| VE – emergência | R ₁ – início do florescimento |
| VC – cotilédone | R ₂ – pleno florescimento |
| V ₁ – primeiro nó | R ₃ – início da formação das vagens |
| V ₂ – segundo nó | R ₄ – plena formação das vagens |
| V ₃ – terceiro nó | R ₅ – início do enchimento das sementes |
| * | R ₆ – pleno enchimento das vagens |
| * | R ₇ – início da maturação |
| V _(n) – enésimo nó | R ₈ – maturação plena |

Fonte: FEHR e CAVINESS (1981).

2.1.2. Exigências hídricas e térmicas da soja

Segundo a EMBRAPA SOJA (2005), a disponibilidade de água é fundamental em dois períodos do ciclo produtivo: germinação/emergência e floração/enchimento dos grãos. No primeiro, tanto o déficit como o excesso podem ser prejudiciais. Já no segundo, a planta atinge o nível máximo de consumo hídrico, alcançando 7 a 8 mm/dia, momento em que a falta de água pode ocasionar alterações fisiológicas nas plantas, resultando na redução do rendimento dos grãos. A necessidade total de água na cultura da soja para obtenção do rendimento máximo varia entre 450 e 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, manejo e duração do ciclo.

A temperatura ideal para o desenvolvimento da soja está em torno de 30°C, mas a cultura se adapta bem em temperaturas do ar variando de 20 a 30°C. Sob temperaturas iguais ou menores que 10°C, o crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo; em temperaturas acima de 40°C, a planta sofre distúrbios na floração e perde a capacidade de reter vagens (EMBRAPA SOJA, 2005).

A semeadura da soja no Estado do Paraná inicia-se no primeiro decêndio de outubro e se estende até o terceiro decêndio de dezembro. A Figura 3 apresenta o zoneamento do risco climático no Estado, para cada época de semeadura, de acordo com FARIAS et al. (2001).

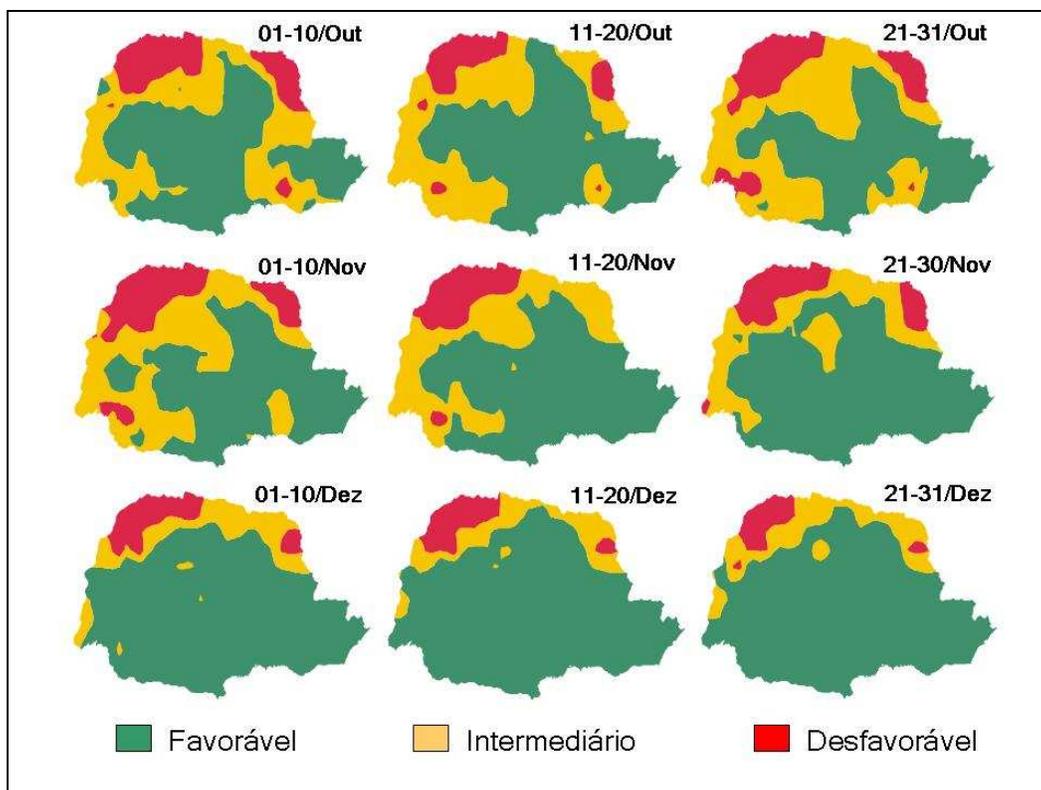


Figura 3. Zoneamento do risco climático para plantio da soja no Estado do Paraná, em diferentes épocas de semeadura.
(Fonte: FARIAS et al., 2001)

2.2. A previsão de safras

A previsão de safras é uma atividade necessária ao planejamento das políticas agrícolas no país, assumindo um importante papel tanto no setor público, quanto no privado. Segundo IPPOLITI-RAMILO (1999), as previsões obtidas com suficiente antecipação à época de colheita são importantes para o planejamento das exportações agrícolas; para a tomada de decisão com relação ao abastecimento do mercado interno; para o planejamento do consumo energético do país e para o estabelecimento de políticas agrícolas que visem o desenvolvimento de produtos considerados relevantes para a economia. De acordo com VICENTE et al. (1990), as estimativas de safra têm como finalidade subsidiar os formuladores de políticas agrícolas e os tomadores de decisão do setor privado ligados às atividades agropecuárias.

No Brasil, o método mais usual para previsão de safras é o Levantamento Sistemático da Produção Agropecuária (LSPA), realizado pelo IBGE. É um método que leva em consideração informações municipais provenientes de agentes ligados ao setor agrícola, como produtores

rurais, bancos de crédito agrícola, cooperativas, agentes de assistência técnica, comerciantes de insumos, entre outros (IBGE, 1989). Entretanto, PINO (2001) relata que este tipo de informação pode ter caráter subjetivo e ser passível de manipulação, não permitindo a análise quantitativa dos erros envolvidos.

A CONAB, outra instituição pública responsável pela divulgação das estatísticas agrícolas, faz o levantamento da safra no país por meio de pesquisas de intenção de plantio e colheita, realizadas várias vezes durante o ano safra, além de consultas às entidades ligadas à produção agrícola. O diferencial deste método é o uso de amostragens pré-estabelecidas nos municípios mais representativos das culturas em cada região do país (CONAB, 2005).

Segundo FONTANA et al. (2000), metodologias envolvendo coleta de informações por meio de questionários aplicados aos produtores ou aos seus representantes são formas difíceis de se obter dados confiáveis, além de serem lentas, onerosas e subjetivas. LUIZ e EPIPHANIO (2001) relatam que outra grande dificuldade nos levantamentos estatísticos tradicionais é devida às falhas de recobrimento, ocasionadas pela falta de acesso às áreas rurais. A necessidade da modernização dos procedimentos atualmente adotados nos sistemas de previsão de safras é um fato reconhecido no Brasil e vem recebendo importância dos órgãos governamentais responsáveis pela elaboração e divulgação das estimativas de safras no país (O ESTADO DE SÃO PAULO, 2004).

Uma outra metodologia de previsão da produtividade é o uso de modelos que descrevem o comportamento de uma cultura agrícola em condições de campo, simulando o seu desenvolvimento desde a semeadura até a colheita. Estes métodos são tentativas de representar, de maneira simplificada, as relações existentes entre a resposta da planta e as variáveis ambientais. DOOREMBOS e KASSAM (1979) propuseram um modelo agrometeorológico baseado na quantificação do estresse hídrico, por meio da relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima, limitado por um fator de resposta na produtividade, cujo valor depende do tipo de cultura e da fase de seu desenvolvimento. Alguns trabalhos mostraram a utilização de modelos agrometeorológicos aplicados à cultura da soja em diferentes regiões do Brasil (PEDRO JÚNIOR et al., 1984, BERLATO, 1987; MORAES et al., 1999 e FONTANA et al., 2001).

Outros modelos têm sido propostos para incorporar variáveis espectrais, extraídas das imagens de sensoriamento remoto. Quando associados aos dados agrometeorológicos, estes

modelos são denominados agrometeorológico-espectrais e quase sempre fazem uso dos índices de vegetação, extraídos da razão ou qualquer outra relação matemática entre duas ou mais bandas espectrais. RUDORFF e BATISTA (1990) propuseram um modelo agrometeorológico-espectral na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando dados extraídos de imagens Landsat/MSS. Seus resultados lhes permitiram concluir que a inclusão da variável espectral elevou o coeficiente de determinação entre a produtividade observada e a estimada pelo modelo, que passou de 0,50 para 0,69.

De acordo com FONTANA e BERLATO (1998), a inclusão da variável espectral nos modelos de previsão agrícola visa estimar parâmetros que não podem ser completamente representados em modelos agrometeorológicos. Quando essa informação espectral é adquirida com maior periodicidade ao longo do ciclo produtivo, torna-se possível avaliar com maior precisão a evolução de parâmetros intrínsecos à cultura, como biomassa e índice de área foliar (IAF), que podem apresentar estreita correlação com a produtividade. Nesse sentido, os sensores orbitais com elevada resolução temporal apresentam-se como fonte importante da informação espectral, principalmente no caso das culturas de ciclo curto, como a soja.

2.3. O sensoriamento remoto orbital e sua aplicação na agricultura

CAMPBELL (1987) define sensoriamento remoto como a ciência de obter informações da superfície terrestre a partir de imagens tomadas à distância. A aquisição dessas informações depende da energia eletromagnética que interage com a matéria. O Sol é a principal fonte de energia eletromagnética, a qual se propaga no espaço e incide sobre a superfície em diversos comprimentos de onda, que constituem o espectro eletromagnético.

Ao encontrar um corpo ou superfície, a energia eletromagnética interage com a matéria de cinco formas diferentes: transmissão, absorção, emissão, reflexão e espalhamento (SABINS, 1986). Essa interação ocorre de maneira diferente para cada tipo de material e para cada comprimento de onda, e depende das características ópticas dessas superfícies em termos de reflectância, absortância e transmitância. A soma desses três componentes de energia (refletida, absorvida e transmitida) é a energia incidente e essa relação é descrita como a equação de balanço de energia.

Os sensores remotos a bordo de plataformas orbitais são desenvolvidos para medir a energia eletromagnética que é emitida ou refletida pela superfície terrestre. A característica

multiespectral desses sensores permite medir e registrar essa energia em determinados intervalos de comprimentos de onda, chamados de bandas espectrais (CAMPBELL, 1987). Sabendo-se que cada superfície apresenta comportamentos espectrais distintos ao longo do espectro eletromagnético, os dados de sensores multiespectrais podem ser utilizados na identificação e mapeamento das superfícies terrestres, desde que se conheçam as características espectrais dessas superfícies nas bandas imageadas pelos sensores (HOFFER, 1978).

O sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta valiosa no monitoramento agrícola devido a sua cobertura sinóptica e habilidade de “enxergar” em diversos comprimentos de onda (LABUS et al., 2002). REES (1990) relata que as principais vantagens do sensoriamento remoto são a rapidez na aquisição de informações sobre grandes áreas da superfície terrestre e a possibilidade de avaliar áreas antes inacessíveis. De acordo com o autor, as aplicações do sensoriamento remoto na agricultura estão relacionadas ao monitoramento da extensão, vigor e tipo de cobertura vegetal; identificação de agentes hospedeiros de doenças; mapeamento de tipos de solo e seu conteúdo de água e previsão de produtividade agrícola. Mas para a condução de estudos envolvendo culturas agrícolas é necessário o conhecimento do comportamento espectral dessas superfícies.

2.3.1. Comportamento espectral da vegetação

As folhas são a estrutura de maior influência no comportamento espectral das plantas. Na Figura 4 é apresentada a curva de reflectância (ou assinatura espectral) de uma folha de soja, cujo comportamento pode ser generalizado como típico de uma folha de qualquer vegetação sadia. Verifica-se que a reflectância varia em função do comprimento de onda, com regiões do espectro mais significativas e distintas nos comprimentos de onda do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio.

HOFFER (1978) e GUYOT (1989) explicam as razões das variações do comportamento espectral das plantas ao longo do espectro eletromagnético. No visível (0,4 a 0,7 μm), a maior parte da radiação é absorvida pelos pigmentos presentes nas folhas, como clorofilas, xantofilas, carotenóides e antocianinas. O pico de reflectância máximo no visível ocorre no comprimento de onda do verde (0,54 μm) e não ultrapassa os 15%.

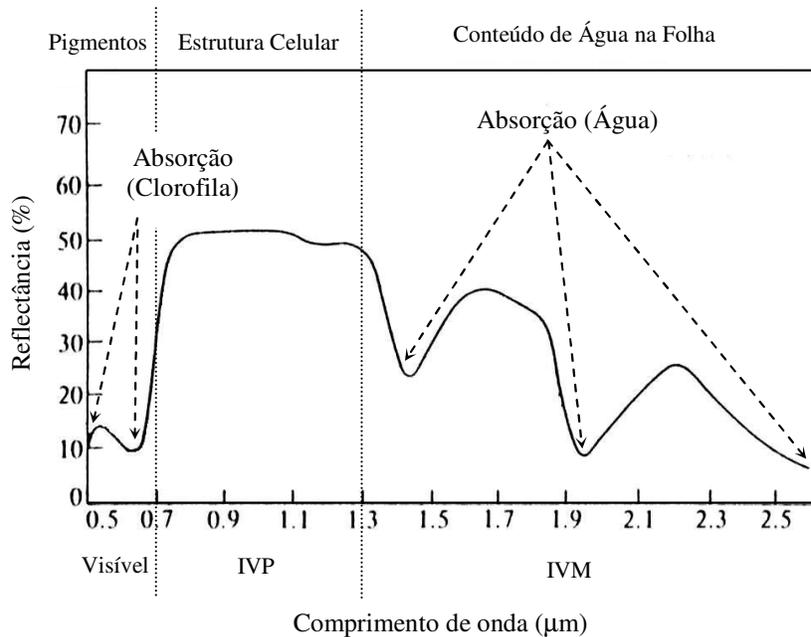


Figura 4. Assinatura espectral de uma folha de soja.
 Fonte: Adaptado de HOFFER (1978).

No infravermelho próximo (0,7 a 1,3 μm), a vegetação verde é caracterizada pela alta reflectância (45 a 50%), alta transmitância (45 a 50%) e baixa absorção (menos de 5%). Tal comportamento é fortemente influenciado pela estrutura celular das plantas. Já no infravermelho médio (1,3 a 2,6 μm), as propriedades ópticas das plantas são influenciadas por intervalos de alta absorção da radiação em função da presença de água, o que ocorre próximo aos comprimentos de onda de 1,4; 1,9 e 2,6 μm .

As propriedades ópticas das plantas podem diferir das propriedades das coberturas vegetais ou dosséis. MYERS et al. (1970) afirmaram que a reflectância medida em laboratório tem similaridades com aquela medida em campo, porém algumas diferenças podem ser notadas. Absorção e espalhamento causados por gases e aerossóis presentes na atmosfera reduzem a radiação solar incidente em certos comprimentos de onda. Variações nas condições de iluminação, geometria das plantas e influência do solo também afetam as medições.

GUYOT (1989) relata que a energia refletida pelas coberturas vegetais e captada pelos satélites é influenciada pelo solo. A influência do solo na reflectância das coberturas vegetais está relacionada às características da cultura, como espaçamento, porte, vigor e fase de desenvolvimento. A Figura 5 ilustra um esquema da evolução da reflectância de uma cobertura vegetal de ciclo anual ao longo de seus estádios de desenvolvimento.

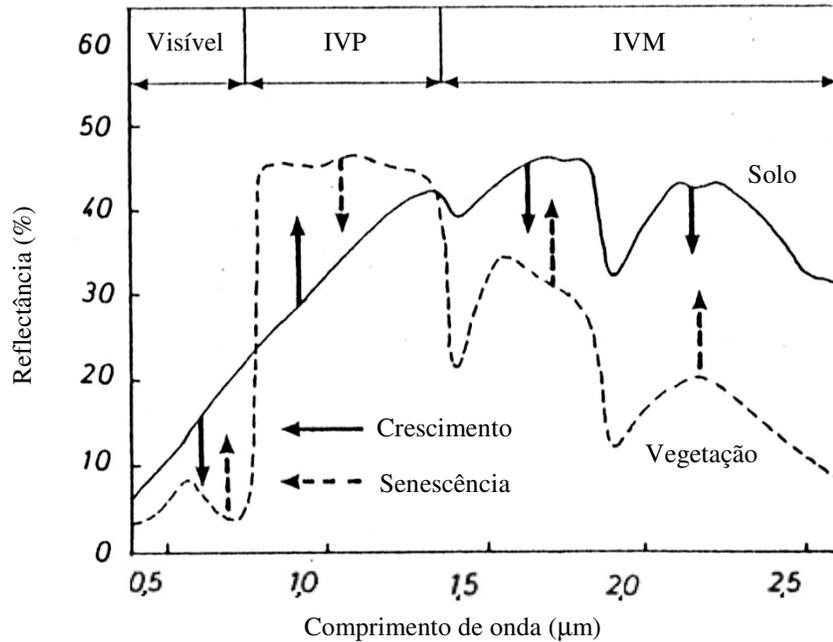


Figura 5. Representação esquemática da evolução da reflectância de uma cobertura vegetal ao longo das fases de crescimento e senescência.
 Fonte: Adaptado de GUYOT (1989).

Quando a cultura é instalada, o comportamento espectral da superfície se assemelha à assinatura espectral do solo (curva cheia), uma vez que as plantas estão germinando e a porcentagem de cobertura vegetal é praticamente nula. À medida que a cultura cresce e a porcentagem de cobertura vegetal aumenta, a influência do solo diminui e o comportamento da superfície tende a se ajustar ao comportamento das plantas verdes (curva tracejada). Ao entrar em senescência, o vigor vegetal e o porte das plantas diminuem, reduzindo a porcentagem de cobertura e alterando o comportamento espectral da superfície, que volta ao padrão do solo. Para amenizar a influência do solo nos estudos de coberturas vegetais, são utilizados os índices de vegetação, descritos a seguir.

2.3.2. Índices de vegetação

Os índices de vegetação são resultado de transformações lineares do fator de reflectância obtido de duas ou mais bandas espectrais, envolvendo soma, razão, diferença ou qualquer outra relação matemática que possa ser combinada (WIEGAND et al., 1991). De acordo com JACKSON (1983), os índices de vegetação foram desenvolvidos com a finalidade de ressaltar a

resposta espectral da vegetação em relação à resposta espectral dos solos. Segundo os relatos de CRIPPEN (1990), o primeiro índice de vegetação foi desenvolvido por JORDAN (1969), que propôs o RVI (*Ratio Vegetation Index*) para exaltar as superfícies de vegetação em relação às demais.

Uma série de trabalhos tem mostrado que os índices de vegetação são diretamente relacionados a parâmetros agronômicos, como o índice de área foliar (PRICE, 1993; HOLBEN et al., 1980), biomassa (JUSTICE e HIERNAUX, 1986; TUCKER, 1979) e porcentagem de cobertura vegetal (SENAY e ELLIOTT, 2002). O uso dos índices de vegetação para quantificar um determinado parâmetro biofísico das culturas agrícolas permite reduzir a dimensão das informações multiespectrais através de um simples número, além de minimizar o impacto das condições de iluminação e visada (WIEGAND et al., 1991).

JACKSON e HUETE (1991) ressaltam que um índice de vegetação ideal deve ser capaz de responder às sutis variações dos estádios fenológicos da vegetação e não pode ser fortemente influenciado por variações nas condições e tipos de solo, na geometria de iluminação e de visada e nas condições atmosféricas. Em outras palavras, os índices espectrais devem ser aplicados independentemente da situação temporal ou espacial, não tendo a sua aplicação restrita a determinada região ou período.

A Tabela 2 apresenta alguns índices de vegetação encontrados na literatura. A maioria deles envolve a reflectância dos canais do vermelho e infravermelho próximo. Juntos, estes canais fornecem mais de 90% das informações espectrais da vegetação (BARET et al., 1989). Com o aumento da biomassa, a reflectância tende a diminuir na região do vermelho e aumentar na região do infravermelho próximo. Com isso, os índices de vegetação exploram o contraste nos valores de reflectância destas duas faixas espectrais.

Tabela 2. Exemplos índices de vegetação encontrados na literatura.

| Índice de Vegetação | Proposto por: | Equação ¹ |
|---|-----------------------------|--|
| <i>Ratio Vegetation Index</i> | JORDAN (1969) | $RATIO = \frac{IVP}{VER}$ |
| <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> | ROUSE et al. (1973) | $NDVI = \frac{IVP - VER}{IVP + VER}$ |
| <i>Transformed Vegetation Index</i> | DEERING et al. (1975) | $TVI = \sqrt{\left(\frac{IVP - VER}{IVP + VER}\right)} + 0,5$ |
| <i>Green Vegetation Index</i> | KAUTH E THOMAS (1976) | De acordo com o sensor Landsat. |
| <i>Simple Ratio Vegetation Index</i> | RICHARDSON e WIEGAND (1977) | $RVI = \frac{VER}{IVP}$ |
| <i>Weighted Difference Vegetation Index</i> | CLEVERS (1988) | $WDVI = IVP - g \times VER$ |
| <i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> | HUETE (1988) | $SAVI = \frac{IVP - VER}{IVP + VER + L} (1 + L)$ |
| <i>Infrared Percentage Vegetation Index</i> | CRIPPEN (1990) | $IPVI = \frac{IVP}{IVP + VER}$ |
| <i>Normalized Ratio Vegetation Index</i> | BARET e GUYOT (1991) | $NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$ |
| <i>Enhanced Vegetation Index</i> | HUETE et al. (1999) | $EVI = 2,5 \times \frac{IVP - VER}{IVP + C_1 \times VER - C_2 \times AZL + L}$ |
| <i>Normalized Difference Moisture Index</i> | WILSON e SADER (2002) | $NDMI = \frac{IVP - IVM}{IVP + IVM}$ |

¹ Legenda:

IVP = reflectância no canal do infravermelho próximo

VER = reflectância no canal do vermelho

IVM = reflectância no canal infravermelho médio

AZL = reflectância no canal do azul

g = declividade da linha do solo

L = fator de correção da cobertura vegetal

C₁ e C₂ = Coeficientes de ajuste para efeito dos aerossóis da atmosfera para as bandas do vermelho e azul, respectivamente

A maior parte dos trabalhos envolvendo a análise da vegetação e das culturas agrícolas tem usado o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) ou Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, proposto por ROUSE et al. (1973). O objetivo do autor foi o de reduzir a influência do solo e separar o brilho da vegetação. De acordo com os estudos de HOLBEN et al. (1980), envolvendo a cultura da soja, o NDVI foi considerado o índice mais adequado para

avaliação das mudanças do vigor vegetal das plantas, mostrando ser exponencialmente relacionado ao índice de área foliar, biomassa e produtividade.

A alta relação entre o NDVI e o IAF, como mostra a Figura 6, demonstra que este tipo de informação espectral é capaz de explicar um dos mais importantes parâmetros agrônômicos das culturas. De acordo com LUCCHESI (1987), o IAF é estreitamente relacionado com a capacidade fotossintética das plantas, pois interfere na interceptação da radiação solar. Altos valores de IAF elevam o nível de interceptação da luz solar, ocasionando o aumento da produção de biomassa pela planta. A produção de biomassa cessa quando a planta atinge um valor de IAF crítico, a partir do qual a taxa fotossintética média diminui. Normalmente, o IAF cresce até o final do florescimento, quando atinge seus maiores valores. A partir daí o IAF decresce durante a maturidade fisiológica, a partir da qual observa-se o amarelecimento da parte aérea das plantas e perda de folhas.

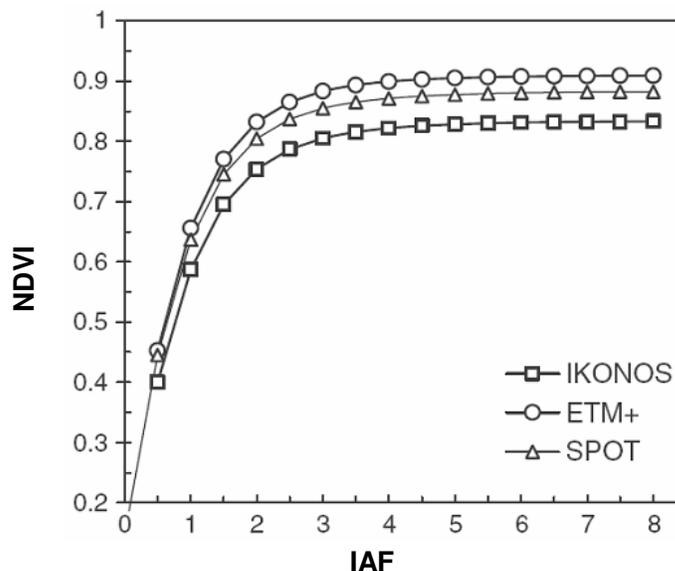
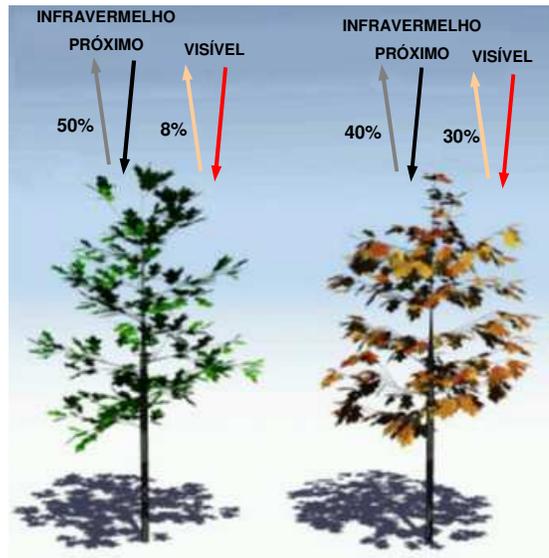


Figura 6. Relação entre o índice de área foliar (IAF) e o NDVI, considerando dados de três sensores orbitais.

Fonte: Adaptado de SOUDANE et al. (2006).

YIN e WILLIAMS (1997) discutem o padrão de resposta do NDVI de alguns alvos na superfície terrestre. Segundo os autores, nuvens, água e neve têm refletâncias maiores no visível do que no infravermelho, sendo que nestas condições o NDVI tem valores negativos. Rochas e solos expostos têm refletâncias similares nestas duas bandas e o resultado no índice de vegetação

é aproximadamente zero. Em imagens com vegetação, o NDVI pode variar de 0,1 a 0,9, onde os valores mais altos são associados com maior vigor e densidade da cobertura vegetal. Este último item pode ser melhor entendido pela Figura 7, que exemplifica o comportamento do NDVI em função de dois tipos de vegetação.



$$\text{NDVI} = \frac{(0,50 - 0,08)}{(0,50 + 0,08)} = 0,72 \qquad \text{NDVI} = \frac{(0,40 - 0,30)}{(0,40 + 0,30)} = 0,14$$

Figura 7. Comportamento do NDVI de uma vegetação sadia (esquerda) e não sadia ou em senescência (direita).

Fonte: Adaptado de NASA'S EARTH OBSERVATORY (2003).

Vegetação fotossinteticamente ativa (à esquerda) absorve a maioria da luz visível que é incidida sobre ela e reflete a maioria da luz infravermelha. Vegetação fotossinteticamente inativa ou vegetação esparsa (à direita) reflete mais luz visível e menos luz infravermelha. Assim, altos valores de NDVI são associados à altas densidades de vegetação sadia. Para casos onde a cobertura vegetal é baixa, HUETE (1988) propôs o SAVI, um índice de vegetação que pode ser ajustado à cobertura vegetal do solo por meio de um parâmetro L inserido na equação do NDVI.

Um problema verificado no NDVI é a possibilidade de saturação, tornando-o insensível ao aumento da biomassa (GAMON et al., 1995; CHEN e BRUTSAERT, 1998). Assim, mesmo havendo aumento da densidade do dossel, o índice estabiliza-se em um mesmo patamar. Alguns autores relataram que a partir do IAF de 3 ou 5, o NDVI apresentou características de saturação

(SELLERS, 1989). Entretanto, quando comparado a outros índices, o NDVI foi o que melhor estimou o índice de área foliar, como relatado por HOLBEN et al. (1980).

WILSON e SADER (2002) alteraram a fórmula do NDVI, substituindo o canal do vermelho pelo infravermelho médio, e criaram o NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*). A proposta dos autores foi a de estudar a influência hídrica na vegetação, uma vez que a faixa do infravermelho médio é mais sensível à umidade por causa das regiões de absorção de água, além de ser menos influenciada pelos efeitos de absorção e espalhamento dos aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera.

2.3.3. Uso de imagens multi-temporais no estudo da vegetação

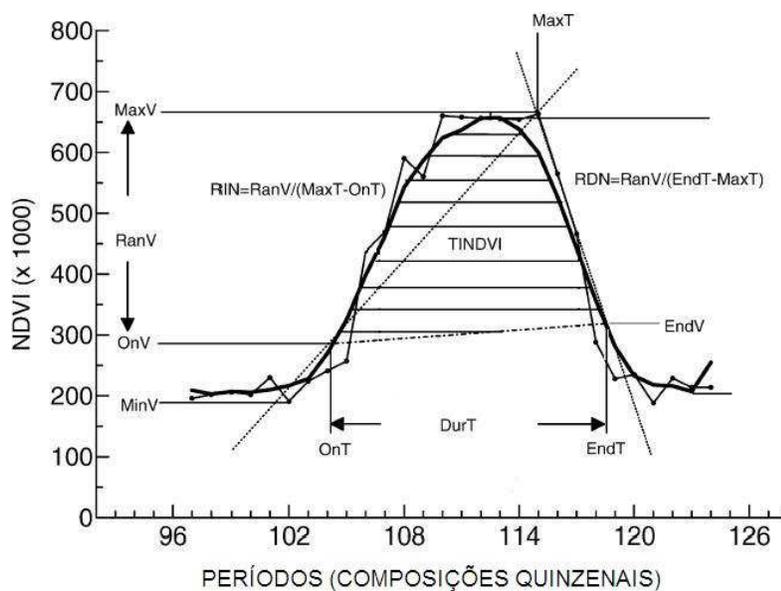
A existência de informações espectrais geradas a partir de plataformas com elevada resolução temporal oferece a oportunidade de avaliar o comportamento espectral das culturas ao longo de todos os seus estádios fenológicos. Segundo MARTINKO et al. (2000), a análise de séries temporais de imagens pode permitir comparar as condições atuais de uma cultura com as condições apresentadas na semana anterior, ou no ano anterior, na mesma época. Além disso, JAKUBAUSKAS et al. (2002) relatam que a análise de imagens multi-temporais pode ser utilizada na discriminação de áreas cultivadas, uma vez que cada cultura apresenta comportamentos distintos de reflectância ao longo do tempo. A Tabela 3 apresenta alguns sensores de órbita polar com elevada resolução temporal.

Tabela 3. Sensores de órbita polar com elevada resolução temporal.

| Sensor | Plataforma | País | Resolução Temporal | Resolução Espacial (m) |
|---------------|-------------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|
| AVHRR/3 | NOAA-15 a 18 | EUA | 12 horas | 1100 |
| AVHRR | NOAA-12 | EUA | 12 horas | 1100 |
| MODIS | Terra/Aqua | EUA | 24 horas | 250, 500 e 1000 |
| Vegetation | SPOT | França | 24 horas | 1000 |
| VIRR | FengYun | China | 12 horas | 1100 |
| WFI | CBERS-2 | Brasil-China | 5 dias | 260 |

A disponibilidade de dados gerados a partir desse tipo de plataforma permite a geração dos perfis temporais de NDVI, que descrevem a condição de biomassa da cultura ao longo de todos seus estádios fenológicos, gerando informações que podem servir de entrada em sistemas de previsão de safras que considerem a informação espectral (LABUS et al., 2002).

HILL e DONALD (2003) e JÖNSSON e EKLUNDH (2004) relatam que as características dos perfis temporais de NDVI podem ser desagregadas num conjunto de parâmetros quantitativos, conforme mostra a Figura 8. Tais parâmetros podem ser usados para derivar informações sobre a fenologia das culturas e ocupação do solo.



| | |
|--|---|
| OnT: data de início do período de maior resposta do NDVI | DurT: duração do período de maior resposta do NDVI |
| OnV: NDVI no início do período de maior resposta | RanV: amplitude do NDVI |
| EndT: data de término do período de maior resposta | RIN: taxa de incremento do NDVI |
| EndV: NDVI no término do período de maior resposta | RDN: taxa de decréscimo do NDVI |
| MaxT: data do valor máximo do NDVI | TINDVI: área integrada do NDVI no período de maior resposta |
| MaxV: valor máximo do NDVI | |

Figura 8. Diagrama ilustrando os parâmetros derivados de um perfil temporal de NDVI.
Fonte: Adaptado de HILL e DONALD (2003).

Diversos trabalhos têm explorado séries multi-temporais de imagens AVHRR/NOAA no monitoramento de culturas agrícolas, seja na estimativa de área plantada ou de produtividade. Alguns desses trabalhos serão discutidos mais adiante, no item 2.5.

2.3.4. Os satélites NOAA e o sensor AVHRR/3

NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) é a agência americana responsável pela administração operacional da série de satélites que leva seu nome. Os satélites NOAA fazem parte do programa POES (*Polar-Orbiting Operational Environmental Satellites*), formado por uma cooperação internacional entre as agências norte-americanas NASA e NOAA, o

Reino Unido e a França, com o objetivo de gerar observações meteorológicas e ambientais diárias, em nível global.

A terceira geração de sistemas de satélites ambientais de órbita polar iniciou-se em 1978, com o lançamento do TIROS-N, sendo composta por mais 10 satélites (NOAA-A a NOAA-J). Atualmente, já se encontra em operação a quarta geração, iniciada em 1998, com o lançamento do NOAA-K. Antes de serem lançados, os satélites NOAA recebem uma letra em seu nome e, após sua operacionalização, essa denominação é feita com algarismos. Estão em operação atualmente os satélites NOAA-12, 15, 17 e 18, sendo já previsto o lançamento do NOAA-N' em 2008.

As plataformas NOAA operam em órbita heliossíncrona com duas altitudes nominais de 830 e 870 km, com um período médio de 102 min, possibilitando uma cobertura global da superfície terrestre em apenas 12 horas (KIDWELL, 1995). A bordo dos satélites NOAA estão presentes nove sensores, entre eles o AVHRR, inicialmente lançado junto ao NOAA-6, em 1979.

O AVHRR é um sensor com um sistema de varredura transversal que possui cinco canais: uma banda na região do visível (vermelho), outra na região do infravermelho próximo e três bandas na região do infravermelho termal do espectro eletromagnético. A largura total de imageamento é de 2700 km e a resolução espacial nominal é de 1,1 x 1,1 km no nadir e 2,4 x 6,9 km nas bordas das imagens. Possui um IFOV (*Instantaneous Field of View*) de 1,3 mrad e uma taxa de 39,936 varreduras por segundo por banda, com um ângulo de varredura igual a $\pm 55,4^\circ$.

A partir da plataforma NOAA-15, o sensor AVHRR foi atualizado para a sua terceira versão, chamada AVHRR/3, que apresenta algumas diferenças em relação às versões anteriores. Nesta versão, o canal 3 pode funcionar tanto com a energia refletida na faixa do infravermelho médio (canal 3A), como com a energia emitida na faixa termal (canal 3B). Porém, somente cinco canais podem ser transmitidos para as estações em terra, de modo que nas órbitas noturnas somente o canal 3B é ativado; nas órbitas diurnas os canais 3A e 3B são alternados de acordo com a luminosidade. Outra diferença do sensor AVHRR/3 está relacionada ao seu circuito de ganho dual para baixos níveis de luminosidade. Essa característica proporciona um aumento da resolução na detecção das radiâncias no intervalo mais baixo de albedo, de 1% a 25% para as bandas 1, 2 e 1% a 12,5% na banda 3A. Isso resulta numa menor perda da resolução nos valores mais elevados de albedo, de 26% a 100% para as bandas 1, 2 e 12,6% a 100% para a banda 3A (GOODRUM et al., 2001). A Tabela 4 exhibe as características do sensor AVHRR/3.

Tabela 4. Características do sensor AVHRR/3.

| Banda | Faixa Espectral (μm) | Região do Espectro | Resolução Espacial (km) |
|--------------|---|---------------------------|------------------------------------|
| 1 | 0,58 a 0,68 | Visível (vermelho) | 1,1 |
| 2 | 0,725 a 1,0 | Infravermelho próximo | 1,1 |
| 3A | 1,58 a 1,64 | Infravermelho médio | 1,1 |
| 3B | 3,55 a 3,93 | Infravermelho termal | 1,1 |
| 4 | 10,3 a 11,3 | Infravermelho termal | 1,1 |
| 5 | 11,5 a 12,5 | Infravermelho termal | 1,1 |

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

O envio dos dados AVHRR às estações de recebimento pode ocorrer em tempo real, cuja transmissão é denominada HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) para os dados com resolução espacial de 1,1 km, ou APT (*Automatic Picture Transmission*) para os dados reamostrados, com resolução de 4 km. Outra forma de envio é a gravação a bordo e posterior retransmissão para as estações em terra. Quando retransmitidos em sua resolução original os dados são denominados LAC (*Local Area Coverage*) e GAC (*Global Area Coverage*), quando retransmitidos em menor resolução.

2.4. O processamento das imagens AVHRR/NOAA

O processamento das imagens AVHRR/NOAA, assim como de qualquer outro sensor, visa preparar os dados brutos recebidos nas estações para sua posterior utilização nas mais diversas aplicações. A quantidade de etapas de processamento, assim como a qualidade de sua execução, dependem da finalidade para qual se destinam as imagens. Por exemplo, para fins meteorológicos ou oceanográficos, não se requer elevada acurácia geométrica; entretanto, para fins de monitoramento terrestre, é demandada uma acurácia que não pode ser superior a um pixel, no caso das imagens NOAA. Calibração radiométrica, correções geométrica e atmosférica, assim como atividades de realce e de geração de produtos são exemplos de processamento pelos quais são submetidas as imagens de sensoriamento remoto.

2.4.1. A calibração radiométrica

De acordo com BIGGAR et al. (1994), os sensores orbitais multiespectrais precisam ser calibrados a fim de que seus dados possam ser utilizados para investigações quantitativas. A calibração radiométrica dos sensores multiespectrais, também chamada de calibração absoluta, é definida como a relação entre o nível de radiância que chega ao sensor e o número digital gerado por este (DINGUIRARD e SLATER, 1999).

Os sensores multiespectrais passam pela primeira calibração antes mesmo de serem lançados, na chamada calibração de pré-lançamento, feita em laboratório, para obtenção dos coeficientes de calibração. Entretanto, os sensores orbitais sofrem degradações ao longo de sua vida útil, sendo necessária a atualização desses coeficientes, o que é feito por meio da calibração de pós-lançamento. Com calibrações de pós-lançamento regulares, é possível quantificar este desgaste e, dessa forma, manter a qualidade necessária para monitorar mudanças temporais na superfície do planeta ao longo da vida útil do sensor (DINGUIRARD e SLATER, 1999). As técnicas para obtenção dos coeficientes de calibração de pós-lançamento envolvem a análise de superfícies de referência radiometricamente estáveis, onde o objetivo é calcular a radiância desses alvos no topo da atmosfera e compará-la aos valores digitais medidos pelo sensor sobre as áreas de referência (PONZONI et al., 2006).

Para o caso dos sensores AVHRR/3, a calibração de pós-lançamento é feita somente para os canais 1, 2 e 3A, cujos coeficientes são regularmente ajustados para considerar a degradação do sensor. Já para os canais termais (3B, 4 e 5), esses coeficientes são determinados a bordo dos satélites, por meio de uma câmara termal a vácuo, que simula as condições do espaço.

2.4.2. A correção geométrica das imagens NOAA

Embora designadas para fins meteorológicos e oceanográficos, que normalmente não requerem alta precisão geométrica, as imagens AVHRR têm sido utilizadas para estudos em terra, que muitas vezes 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 dos dados AVHRR. No caso dos dados GAC, essa preocupação com a acurácia geométrica tem sido desnecessária, devido a reamostragem na produção dos dados, o

que os torna de baixíssima resolução espacial. Porém, ao se utilizar dados LAC ou HRPT, torna-se necessária a utilização de algoritmos mais acurados.

A correção geométrica de imagens, ou georreferenciamento, é definida como um processo que transforma a imagem de satélite em uma projeção cartográfica conhecida (HO e ASEM, 1986). Essa operação é feita por meio de dados de efeméride atualizados e modelos orbitais apropriados, de forma a prever a localização precisa do satélite no momento da geração da imagem. Entretanto, segundo relatam EMERY et al. (1989), modelos orbitais imprecisos, variações de atitude dos satélites e atraso dos relógios acabam influenciando o processo de georreferenciamento, afetando a qualidade geométrica das imagens geradas. Para resolver o problema, é necessário um passo adicional, um processo mais refinado denominado registro de imagens.

O registro de imagens é definido como o processo que determina a mais acurada correspondência geométrica entre duas ou mais imagens adquiridas simultaneamente ou em diferentes momentos, pelo mesmo ou por diferentes sensores (LE MOIGNE et al., 2002). O método é baseado em pontos de controle (*Ground Control Points – GCPs*), ou pares de coordenadas coletados em feições geográficas conhecidas, presentes em uma imagem e em uma base cartográfica precisa, que pode ser uma outra imagem, cartas, vetores geográficos ou dados de GPS (*Global Positioning System*). A partir daí, equações polinomiais e operações de reamostragem são utilizadas para ajustar o sistema de coordenadas de uma imagem à outra.

O termo “navegação de imagens” é citado por vários autores, principalmente na literatura estrangeira. EMERY et al. (2003) definem a navegação de imagens como a combinação entre a correção geométrica e o registro de imagens. Em outras palavras, o processo de navegação é aquele que transforma uma imagem sem qualquer projeção cartográfica ou sistema de referência numa imagem geometricamente acurada.

PERGOLA e TRAMUTOLI (2000) relatam que o registro de imagens baseado em coleta de pontos de controle e reamostragens consome excessivo tempo, requer intensa intervenção humana e não garante a mesma acurácia geométrica ao longo de toda a cena. Além disso, o método pode ser inviável quando aplicado a grandes séries temporais de imagens (LE MOIGNE et al., 2002).

O problema da navegação precisa das imagens AVHRR/NOAA é tratável em teoria, mas tem provado ser de difícil solução na prática. Uma alternativa para reduzir a intervenção

humana no processo de navegação das imagens foi inicialmente proposta por MORENO e MELIÁ (1993). Os autores relataram um método de navegação precisa de imagens AVHRR/NOAA baseado em um modelo orbital Kleperiano, alimentado por parâmetros orbitais extraídos dos dados de efeméride. A diferença é que a precisão dos parâmetros orbitais foi sensivelmente melhorada, fazendo com que os modelos orbitais se tornassem mais acurados, aumentando a precisão do processo de georreferenciamento e evitando a atividade de registro de imagens. Para conseguir isso, os autores desenvolveram um algoritmo para calcular a distância exata entre o satélite e o centro da Terra no momento da passagem, medida necessária para o ajuste dos parâmetros orbitais. Esse cálculo foi realizado por meio da coleta de pontos de controle. Neste caso, os poucos GCPs coletados não foram utilizados para reamostrar a imagem, mas sim para o cálculo da distância satélite-Terra. Assim, a maior vantagem desse método é a reduzida quantidade de pontos de controle necessária à correção da imagem.

Trabalho semelhante foi apresentado por ROSBOROUGH et al. (1994), que propuseram um método de navegação indireta para o georreferenciamento preciso das imagens AVHRR/NOAA. Os autores partiram do princípio de que a maior parte dos erros de georreferenciamento é devida aos erros de atitude do satélite (EMERY et al., 1989), ou seja, variações dos três eixos de movimentação da plataforma orbital (*roll*, *pitch* e *yaw*), conforme mostra a Figura 9.

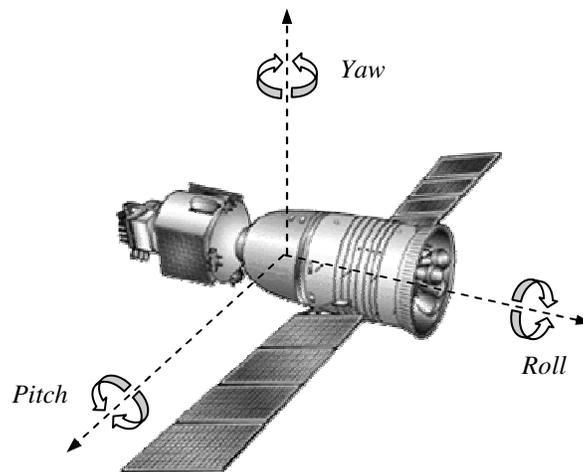


Figura 9. Os três ângulos de movimentação de uma plataforma orbital.

A existência de erros de atitude indica que o satélite não se encontra perfeitamente alinhado ao seu sistema geodésico de posicionamento, ou seja, a plataforma orbital está desalinhada em relação à Terra, afetando a precisão geométrica das imagens geradas. Para solucionar o problema, os autores desenvolveram um modelo para estimar os erros de atitude por meio de pontos de controle em terra. Baseando-se numa imagem gerada sem qualquer correção dos erros de atitude e de uma base cartográfica precisa, os autores coletaram pontos de controle em feições conhecidas e calcularam os deslocamentos em termos de latitude e longitude.

A partir destes pares de coordenadas, o modelo desenvolvido gerou os parâmetros de correção dos erros de atitude no momento da passagem do satélite. Estes parâmetros foram então aplicados num modelo de navegação específico que considera tais erros, gerando uma imagem com um erro máximo de um pixel. Assim como o trabalho de MORENO e MELIÁ (1993), a grande vantagem deste método é o reduzido número de pontos de controle (apenas dois) necessários para a geração dos parâmetros de correção do posicionamento do satélite. Os autores enfatizam que esta técnica assume que os erros de atitude são constantes ao longo de todo o intervalo de uma passagem, de acordo com os relatos de BRUNEL e MARSOUIN (1993).

Embora os trabalhos de MORENO e MELIÁ (1993) e de ROSBOROUGH et al. (1994) tenham representado um grande avanço na questão do georreferenciamento preciso das imagens AVHRR/NOAA, eles não apresentaram um modelo totalmente automático, uma vez que necessitavam da intervenção humana no momento da coleta dos pontos de controle. Neste sentido, alguns trabalhos vêm propondo soluções para a coleta automática de pontos de controle para correção dos parâmetros orbitais.

PERGOLA e TRAMUTOLI (2000) desenvolveram um método automático de coleta de pontos de controle utilizando regiões costeiras. Tais regiões eram automaticamente identificadas na imagem (em função de seu elevado gradiente de variação da reflectância) e comparadas a uma imagem de referência composta por um modelo digital de elevação. Coletados os pontos de controle, os autores aplicaram o método de ROSBOROUGH et al. (1994), de forma a identificar os erros de atitude do satélite e renavegar a imagem. Anos mais tarde, os autores publicaram um artigo descrevendo a validação deste sistema em dois anos de operação (PERGOLA e TRAMUTOLI, 2003).

Outra técnica disponível para identificação automática de pontos de controle em imagens AVHRR/NOAA é a chamada Máxima Correlação Cruzada (MCC), inicialmente

utilizada por LEESE et al. (1971) para a detecção da movimentação de nuvens a partir de imagens de satélites meteorológicos geoestacionários. Mais tarde a técnica foi utilizada por NINNIS et al. (1986) e EMERY et al. (1992) no cálculo da velocidade de correntes oceânicas. O objetivo da técnica da MCC aplicada a pares de imagens é determinar feições semelhantes entre elas, ou seja, encontrar padrões em comum. Os autores acima citados utilizaram esse método em pares de imagens termais, de modo a encontrar feições de temperatura semelhantes e estimar o movimento de correntes oceânicas entre duas imagens consecutivas, encontrando assim a velocidade de deslocamento dessas correntes. EMERY et al. (2003) discutem que o mesmo princípio pode ser aplicado para determinar pontos de controle em pares de imagens. Os autores aplicaram a MCC para determinar feições semelhantes entre uma imagem alvo (com georreferenciamento não acurado) e uma imagem base, geometricamente precisa. As feições encontradas deram origem a pontos de controle entre as duas imagens, que mais tarde foram utilizados para alimentar o algoritmo proposto por ROSBOROUGH et al. (1994) para determinar os erros do satélite. Este método para identificação automática de pontos de controle é bastante eficiente, porém requer que as imagens alvo e base sejam intensivamente filtradas por meio de detectores de nuvens, de modo a impedir que a temperatura fria das nuvens interfira na identificação das feições termais. A técnica da MCC foi utilizada neste trabalho e será discutida adiante.

EUGENIO e MARQUÉS (2003), seguindo a mesma teoria de correção dos parâmetros orbitais, desenvolveram um sistema de navegação precisa de imagens AVHRR/NOAA, baseado na extração automática de pontos de controle utilizando uma técnica de detecção de contornos. Os contornos detectados na imagem (como uma costa ou um lago) eram analisados e comparados a uma base mundial de feições geográficas. Quando as feições combinavam, os pontos de controle eram determinados. Esta técnica foi combinada a um modelo de predição orbital, gerando imagens geometricamente precisas, com erros de no máximo um pixel.

2.4.3. A correção atmosférica

As partículas sólidas, líquidas e gasosas presentes na atmosfera terrestre afetam os sinais recebidos pelos sensores orbitais. Assim, a radiância captada por esses sensores é proveniente tanto do alvo imageado quanto da atmosfera. De acordo com ZULLO JR. (1994), os principais

efeitos da atmosfera real no sinal captado pelo sensor são a diminuição da faixa de valores digitais registrados pelo radiômetro, a diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e a alteração do brilho de cada ponto da imagem.

A correção atmosférica, ou a retirada dos efeitos atmosféricos no sinal recebido pelo sensor, pode ser realizada por métodos simples ou complexos. Os métodos simples utilizam informações intrínsecas das próprias imagens, não dependendo de parâmetros atmosféricos ou de dados de superfície. Um exemplo é o método *Empirical Line* (GAO et al., 1991), onde a reflectância da superfície é obtida através de uma regressão linear entre a reflectância de alvos conhecidos (como corpos d'água) e os dados de radiância dessas feições nas imagens. Já os métodos complexos, ou métodos físicos, fazem uso de informações sobre as propriedades ópticas da atmosfera e necessitam do conhecimento da interação da radiação com a atmosfera e a superfície. Um exemplo de um método físico de correção atmosférica é o modelo de transferência radiativa 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*), proposto por TANRÉ et al. (1987).

Tanto os métodos simplificados como os complexos apresentam restrições: os simplificados são limitados, dependem das feições presentes nas imagens e podem produzir erros de estimativa da reflectância terrestre; já os complexos exigem o conhecimento de parâmetros da atmosfera no momento da aquisição da imagem, o que nem sempre é possível. Estudos recentes têm proposto o uso de dados do sensor MODIS e sua inclusão nos modelos de transferência radiativa para correção atmosférica de imagens (NASCIMENTO, 2006), o que evitaria a necessidade de medições *in-loco*. No entanto, estes métodos ainda não se encontram operacionais, dificultando a execução da correção atmosférica em séries multi-temporais de imagens. Nestes casos, para amenizar os efeitos da atmosfera, são utilizadas as composições de máximo valor, descritas a seguir.

2.4.4. Composições de valor máximo

Um produto das imagens AVHRR/NOAA largamente utilizado são as composições de valor máximo ou MVC (*Maximum Value Composition*). Esta técnica foi inicialmente proposta por NOAA (1983) para minimizar a presença de nuvens e efeitos atmosféricos em imagens GVI (*NOAA Global Vegetation Index*), um produto mensal com informações globais sobre um índice

de vegetação. Este método vem sendo largamente aplicado em dados de NDVI, onde o valor máximo de um dado pixel numa série temporal de imagens é utilizado para a construção de uma composição máxima de um dado período, como se vê na Figura 10.

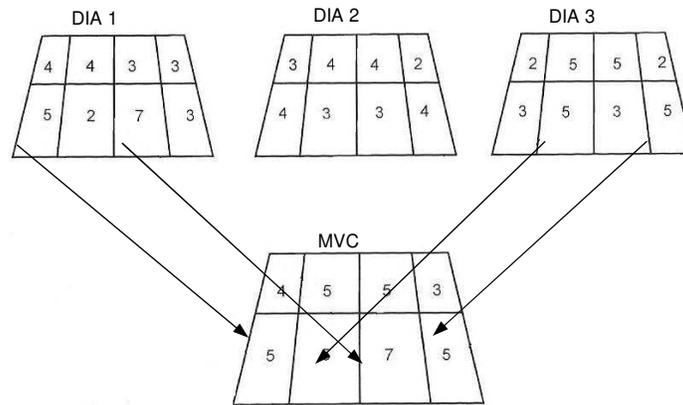


Figura 10. Elaboração de uma composição de máximo valor a partir de dados diários.
Fonte: Adaptado de MOREIRA e SHIMABUKURO (2004).

Considerando que nuvens tornam o valor do NDVI negativo, os pixels contaminados pela influência atmosférica têm menor probabilidade de entrarem na composição máxima. É importante ressaltar que as imagens que dão origem à composição máxima devem ter um georreferenciamento preciso, de forma a garantir que cada pixel corresponda à mesma localização geográfica em qualquer uma das imagens da série multi-temporal em questão.

HOLBEN (1986), analisando composições máximas de NDVI, concluiu que esta técnica reduz os efeitos da reflectância direcional, minimiza efeitos de sombras e do ângulo de insolação e diminui os efeitos dos aerossóis e vapores d'água. Segundo o autor, quanto mais longo o período da composição, maior a atenuação dos efeitos atmosféricos. Entretanto, séries muito longas reduzem a quantidade de dados para análise da dinâmica espectral da vegetação, de forma que o período das composições deve considerar as características atmosféricas da área de estudo, assim como a vegetação envolvida.

Em regiões com longos períodos de nebulosidade é comum a presença de pixels contaminados com nuvens nas composições máximas. Uma alternativa a esse problema é aumentar o intervalo de tempo das composições. Outra possibilidade é descrita por CHEN et al. (2003), que sugerem ser necessária a remoção de pixels contaminados por nuvens antes da elaboração das composições máximas. Comparando composições máximas tradicionais e

composições máximas condicionais (com a remoção de pixels contaminados por nuvens), os autores observaram que durante um mesmo ciclo agrícola num dado pixel, o número de composições máximas tradicionais era maior que o de condicionais. Ou seja, muitas composições tradicionais eram produzidas com dados contaminados com nuvens. Dessa forma, os autores sugerem a utilização de composições condicionais, evitando que pixels contaminados com nuvens entrem na análise multi-temporal.

HOCHHEIM e BARBER (1998) também sugerem a remoção de pixels contaminados por nuvens nas composições máximas de NDVI. Os autores relatam que pixels contaminados com resíduos de nuvens causam flutuações expressivas nos perfis temporais do NDVI, prejudicando sua análise.

2.5. Aplicações de imagens AVHRR/NOAA na agricultura

A maior parte dos trabalhos envolvendo as imagens AVHRR/NOAA na agricultura explora sua alta resolução temporal para o estudo das culturas ao longo de todo o seu ciclo produtivo, e não somente em determinadas fases, como é o caso dos sensores de menor resolução temporal. Os objetivos destes estudos estão relacionados ao monitoramento de culturas, discriminação de áreas cultivadas e estimativas de safra. Alguns relatos são descritos a seguir.

2.5.1. Correlação de dados espectrais AVHRR com a produtividade das culturas

Diversos trabalhos exploram a característica multi-temporal dos dados NOAA na estimativa de produtividade das culturas agrícolas. Alguns deles são baseados somente na informação espectral; outros, fazem uso de dados agrometeorológicos. LIU e KOGAN (2002) utilizaram o índice de vegetação NDVI e o índice de temperatura TCI (*Temperature Condition Index*), baseados em imagens NOAA, para estimar a produtividade de soja no Brasil. Os autores construíram nove modelos de rendimento da soja (um para cada um dos oito maiores estados produtores e um para o Brasil todo), utilizando dados de produção observada em conjunto com os índices das imagens NOAA referentes ao período de 1985 a 1995. Suas conclusões foram que os índices estudados foram úteis no monitoramento de culturas e no desenvolvimento de modelos de previsão de safra, de modo que as imagens NOAA apresentam grande potencialidade de uso para

estes fins. Para o aperfeiçoamento desses modelos, os autores sugerem a utilização de dados locais em conjunto com dados de satélite.

HOCHHEIM e BARBER (1998) concluíram ser possível o desenvolvimento de um modelo de previsão da safra de trigo utilizando uma série histórica de dados NDVI/AVHRR relativamente pequena (4 anos). Os autores puderam gerar estimativas da safra de trigo antecipadas com um erro máximo de 5% em comparação às estatísticas oficiais na região oeste do Canadá. Para tanto, foram construídos perfis do NDVI ao longo do ciclo fenológico entre os anos de 1987 a 1990. Destes perfis foram extraídos parâmetros colhidos num intervalo definido como “período de predição”, englobando as fases de maior resposta do NDVI. Foram calculados o NDVI médio de três em três semanas, o NDVI acumulado em 12 semanas (durante todo o período de predição), o NDVI acumulado em 7 semanas (numa faixa mais estreita do período de predição) e somatória dos 7 maiores valores de NDVI ao longo do período. Todos os parâmetros foram utilizados em regressões lineares, sendo que o NDVI acumulado em 12 semanas foi o parâmetro que apresentou a maior correlação com a produtividade e que melhor a estimou. Este foi um dos primeiros trabalhos a explorar o comportamento temporal do NDVI, buscando explicar a produtividade de uma cultura.

AIGNER et al. (2000) desenvolveram um modelo de predição de safras aplicável às culturas de trigo e cevada, utilizando dados de NDVI/AVHRR e informações meteorológicas. Ao todo, os autores avaliaram a relação entre a produtividade das culturas e quatro parâmetros: NDVI, data de início da fase de enchimento de grãos, dias de estresse hídrico e precipitações durante a fase de crescimento. Usando dados de 1995 a 1997, um modelo gerado a partir de regressão linear múltipla foi proposto e testado. Seus resultados mostraram que todos os parâmetros avaliados tiveram correlação com a produtividade final das culturas. Três datas de predição foram testadas, sendo que o momento de máximo valor do NDVI foi o que gerou predições mais precisas. Entretanto, ao testar o modelo durante a safra de 1998, os autores não obtiveram bons resultados, em função de geadas ocorridas no período de desenvolvimento. Dessa forma, concluem ser necessária a inclusão de mais informações climáticas e dados de doenças ao modelo para obtenção de maior acurácia.

LABUS et al. (2002) examinaram perfis de NDVI/AVHRR para estimativa regional e local da safra de trigo. Em ambos os casos foi constatada uma forte correlação da produtividade com valores integrados de NDVI, calculados sobre o ciclo produtivo inteiro. Menores correlações

foram obtidas quando considerados valores de NDVI extraídos em determinados períodos do ciclo. Os melhores resultados foram obtidos em nível regional, uma vez que a resolução espacial do sensor AVHRR não permitiu uma adequada análise local. De acordo com os autores, os perfis de NDVI podem gerar boas estimativas de produtividade no final do ciclo produtivo e durante a última etapa de crescimento, antes da colheita. A análise do NDVI nas primeiras fases do ciclo gerou estimativas pobres, limitando as possibilidades de previsão da safra de trigo logo nos primeiros meses de cultivo. Mesmo assim, autores sugerem que o monitoramento do NDVI nos estádios iniciais de crescimento pode gerar algum nível de informação aos agricultores sobre o potencial produtivo da cultura, principalmente nos casos onde não existem outras fontes de informação.

UNGANAI e KOGAN (1998), em estudo envolvendo a seca na África do Sul, relataram que índices de vegetação e temperatura puderam ser utilizados para a geração de estimativas de rendimento na cultura do milho. Seus resultados mostraram que as características temporais e espaciais da seca na África do Sul puderam ser detectadas e monitoradas pelos índices TCI e VCI (*Vegetation Condition Index*), obtidos via imagens AVHRR/NOAA, e que os mesmos puderam também gerar estimativas de rendimento da cultura do milho seis semanas antes da colheita.

RASMUSSEN (1992) utilizou imagens AVHRR/NOAA para estimar a produtividade do milho durante uma única safra em Burkina Faso, na África. Por meio do cálculo do NDVI acumulado e de técnicas estatísticas de regressão, o autor encontrou fortes correlações entre o NDVI e a produtividade do milho, que ocorreram somente nos estádios reprodutivos. A falta de correlações mais elevadas nas demais fases de desenvolvimento foi explicada pela pequena quantidade de imagens utilizadas no trabalho e pela elevada variabilidade da produtividade na região do estudo. O trabalho apresentou bons resultados, explicando grande parte da variabilidade do milho. Entretanto, o uso de apenas uma safra não permitiu comprovações mais fundamentadas.

POTDAR (1993) estimou a produtividade do sorgo na Índia utilizando 14 imagens AVHRR de uma única safra. O autor determinou a produtividade real da cultura 45 dias antes da colheita, com acurácia de $\pm 15\%$, em relação à produtividade real obtida. Em estudo semelhante, HAYES e DECKER (1996) explicaram 50% da variabilidade da produtividade do milho na região do cinturão do milho americano.

SUGAWARA (2001) desenvolveu um modelo para o acompanhamento e estimativa da produtividade da cultura da soja em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), a partir de um modelo agrometeorológico pontual e imagens AVHRR. O modelo apresentado utilizou parâmetros agronômicos e meteorológicos para estimar a produtividade máxima ou potencial, a qual foi penalizada quando a demanda hídrica não foi suprida adequadamente, gerando a produtividade real estimada. O sistema foi testado em três anos-safra no Estado do Paraná, gerando resultados bastante satisfatórios. A finalidade das imagens NOAA no sistema foi a de estimar o IAF das áreas de soja, o que não foi conseguido, segundo os relatos da autora, que optou por usar valores obtidos na literatura. Entretanto, o trabalho utilizou imagens AVHRR/NOAA reamostradas para uma resolução de 8 x 8 km, o que pode ter aumentado a mistura espectral e ter camuflado a resposta da soja.

DORAISWAMY e COOK (1995) utilizaram três anos de imagens AVHRR/NOAA na geração de estimativas da produtividade do trigo nos estados da Carolina do Norte e do Sul, nos Estados Unidos. Os autores concluíram que o meio mais promissor para melhorar as estimativas de produtividade é utilizar séries temporais mais longas de imagens, pois apenas os três anos utilizados não foram suficientes para gerar um modelo. Além disso, os autores julgaram ser necessário o uso de dados meteorológicos para aumentar a precisão das estimativas e a restrição da análise espectral às áreas agrícolas. Este último passo é de extrema importância para evitar que a análise inclua a resposta espectral de alvos não agrícolas ou de culturas diferentes. Máscaras de cultivo podem ser obtidas a partir de sensores de maior resolução espacial ou por técnicas para determinar nas imagens NOAA os pixels mais “puros”, ou seja, contendo apenas a cultura em estudo.

2.5.2. Monitoramento de culturas com imagens AVHRR/NOAA

Outro uso das imagens NOAA está relacionado ao monitoramento das culturas ao longo do ciclo produtivo. Alguns desses trabalhos exploram a característica multi-temporal dos dados NOAA para caracterizar os estágios de desenvolvimento das culturas. É o caso de XIN et al. (2002), que utilizaram composições decendiais de NDVI extraídas de imagens AVHRR/NOAA ao longo de dez anos. Ao todo, seis estádios fenológicos puderam ser definidos, três para cada cultura, o que lhes permitiram concluir que composições decendiais de NDVI são indicadores úteis no monitoramento do desenvolvimento fenológico em nível regional. Esses resultados

mostram o potencial dessa técnica aplicada às imagens AVHRR/NOAA na determinação da fase em que a cultura se encontra, além de gerar informações sobre a duração do ciclo produtivo, essencial em modelos agrometeorológicos.

Visando analisar as diferenças entre os perfis de NDVI de soja obtidos em diferentes regiões produtoras no Rio Grande do Sul, FONTANA et al. (2000) utilizaram imagens AVHRR/NOAA para o monitoramento da biomassa em áreas daquele Estado. Os autores observaram diferenças na evolução temporal do NDVI, o que evidencia, segundo eles, a potencialidade do uso de imagens NOAA no acompanhamento do desenvolvimento da biomassa da cultura da soja, em nível regional. Resultados como esse mostram que conhecimento prévio do perfil característico do NDVI de uma dada região (obtido por meio de uma série histórica de dados NOAA) e sua comparação com o perfil da safra em andamento, podem ajudar a indicar, de forma comparativa, o potencial produtivo dessa região na safra em questão.

DALEZIOS et al. (2001) relataram que a condição, distribuição, estrutura e desenvolvimento das culturas ao longo dos estádios fenológicos podem afetar a relação entre produtividade e o NDVI. Com base neste pressuposto, os autores analisaram a aplicação de um modelo de regressão para o monitoramento da produtividade do algodão através do uso do NDVI, extraído de imagens AVHRR/NOAA ao longo de três anos. Suas conclusões foram que as funções biofísicas das plantas puderam ser detectadas via satélite, permitindo a extração de dados de produtividade. A produtividade do algodão pôde ser satisfatoriamente determinada e a técnica aplicada permitiu a determinação do potencial produtivo da cultura.

MOTTA et al. (2003), em estudo envolvendo a cultura da soja no Rio Grande do Sul, observaram a influência de aspectos regionais, como clima, gerenciamento e ocupação das lavouras vizinhas, na evolução temporal do NDVI obtido com imagens NOAA. Seus resultados mostraram que a evolução temporal do NDVI apresentou sensibilidade em relação às diferenças de uso e cobertura do solo, demonstrando que as escalas espacial e temporal das imagens NOAA são aptas ao acompanhamento, em nível regional, da evolução da biomassa ao longo do ciclo produtivo.

SEILER et al. (2000) realizaram o monitoramento de impactos climáticos e da produtividade agrícola na maior região produtora de grãos da Argentina. Seus objetivos foram monitorar os impactos da seca e a produtividade do milho por meio de imagens AVHRR/NOAA. Seus resultados mostraram a potencialidade dos índices VCI e TCI na avaliação da variabilidade

climática e na previsão da safra do milho na região estudada, confirmando os relatos de UNGANAI e KOGAN (1998), que também utilizaram esses índices. De acordo com os autores, mais de 80% da variabilidade no rendimento do milho foi explicada pela avaliação do VCI e TCI. Os autores ainda concluem ser possível a previsão da safra do milho naquela região dois meses antes da colheita utilizando as técnicas abordadas em seu estudo.

2.5.3. Discriminação do uso do solo com imagens AVHRR/NOAA

Outro tipo de estudo envolvendo imagens AVHRR/NOAA é a discriminação do uso do solo, principalmente a determinação de áreas cultivadas. Este tipo de análise pode ser feito tomando-se com base uma única imagem, em um dado momento do ciclo. Ou, ainda, pode-se explorar a alta periodicidade das imagens NOAA na discriminação de áreas cultivadas. Um exemplo é o trabalho de JAKUBAUSKAS et al. (2002), que utilizaram composições quinzenais de NDVI e aplicaram a técnica da análise harmônica (ou de Fourier) para caracterização de mudanças sazonais das áreas agrícolas presentes numa área de estudo. Sabendo-se que cada cultura apresenta um padrão distinto de variação do NDVI com fortes características periódicas, os autores aplicaram a análise harmônica para a caracterizar e identificar áreas ocupadas por milho, trigo, alfafa, pastagem e pradarias.

SENAY e ELLIOTT (2002) avaliaram a combinação entre imagens AVHRR/NOAA e um mapa temático de cobertura do solo na discriminação de classes de pastagens compostas por diferentes espécies e distintas porcentagens de cobertura. Os autores utilizaram composições quinzenais de NDVI englobando os meses de maior atividade biológica da vegetação e concluíram que as imagens AVHRR foram capazes de distinguir classes de pastagens com diferentes porcentagens de cobertura vegetal. O estudo também mostrou que, dentro de uma mesma classe, áreas com maior cobertura vegetal resultaram em valores de NDVI mais altos, enquanto que áreas com menor cobertura tiveram valores mais baixos de NDVI.

Com o objetivo de mapear ecossistemas de savanas por meio de seus padrões temporais, CHACÓN-MORENO (2004) utilizou composições mensais de NDVI/AVHRR para analisar a fenologia de superfícies com diferentes coberturas vegetais. Após gerar os padrões temporais de NDVI dos ecossistemas a partir de 54 composições obtidas em 1 ano e três meses, o autor aplicou análises estatísticas para selecionar as imagens mais representativas do período. Nestas imagens,

seis no total, foi aplicada a classificação supervisionada pelo método da distância de Mahalanobis. Além de gerar um mapa de ecossistemas da região de estudo com um acerto de 79%, o autor ressalta a potencialidade das imagens NDVI/AVHRR no entendimento dos padrões fenológicos da vegetação, cujo comportamento apresentou forte correlação com as variáveis ambientais e climáticas, como a quantidade de chuvas. Embora este estudo não tenha sido aplicado à agricultura, ele apresenta uma metodologia capaz de ser adaptada a outras aplicações.

Um dos maiores problemas na utilização de imagens AVHRR/NOAA na determinação de áreas cultivadas é a sua baixa resolução espacial. Esta característica assume maior importância quando as áreas monitoradas não apresentam homogeneidade na ocupação do solo. Como resultado, a medida radiométrica do pixel representa, na verdade, uma mistura das medidas radiométricas de todas as superfícies presentes neste pixel, mais a contribuição atmosférica. Nesse sentido, o uso de classificadores convencionais nem sempre produz bons resultados. Tais métodos rotulam um determinado pixel em uma única classe, desconsiderando a possibilidade de haver mistura espectral na extensa área representada pelo pixel NOAA.

Algumas técnicas têm sido propostas para a análise sub-pixel em imagens de baixa resolução espacial, como o uso de redes neurais (BERNARD et al., 1997), lógica fuzzy (FOODY, 1998; ANTUNES, 2005) e modelos lineares de mistura espectral (QUARMBY et al., 1992; SETTLE e DRAKE, 1993). Todas estas técnicas visam estimar as proporções de cada superfície dentro de um determinado pixel.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado nas regiões oeste e centro-oeste do Estado do Paraná, segundo maior produtor de soja do Brasil. Responsáveis por cerca de 40% da produção de soja no Estado, as regiões oeste e centro-oeste apresentam rendimentos altamente correlacionados àqueles encontrados no restante do Paraná. A região monitorada é delimitada pela área de cobertura da cena Landsat 223/77, utilizada como referência na determinação das áreas de soja, como será visto mais adiante. Foram incluídos somente os municípios cobertos em mais de 50% de sua área pela cena Landsat. A Figura 11 mostra a região monitorada, compreendida por 70 municípios, listados no Anexo 1.

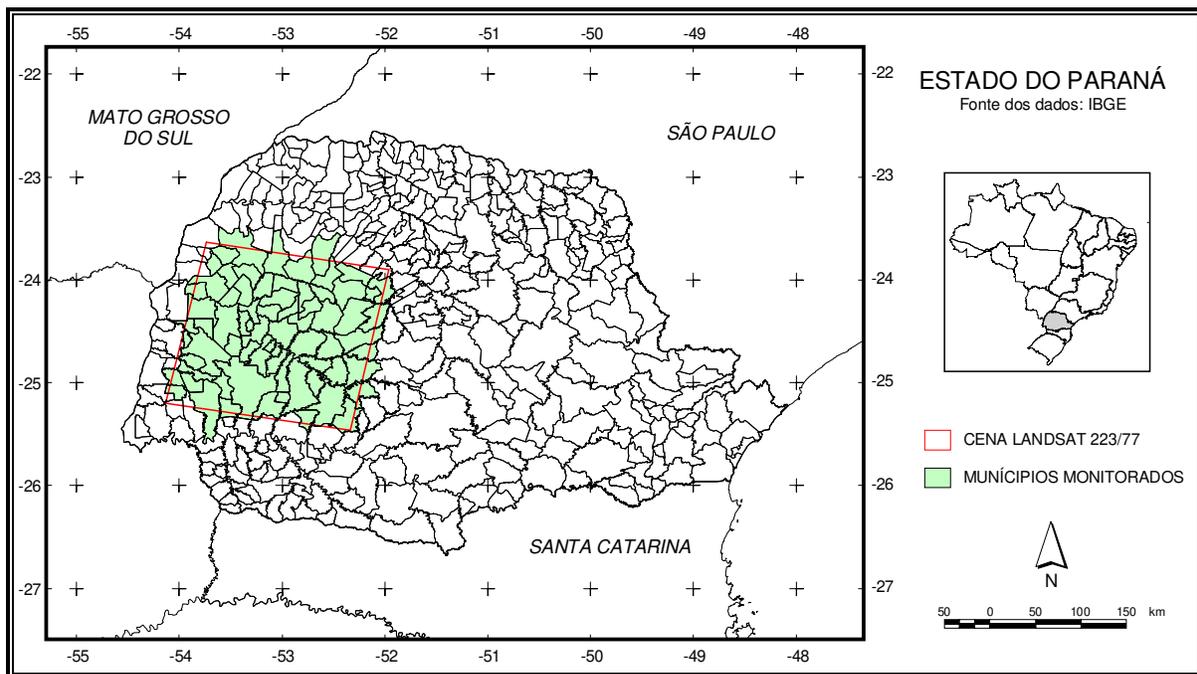
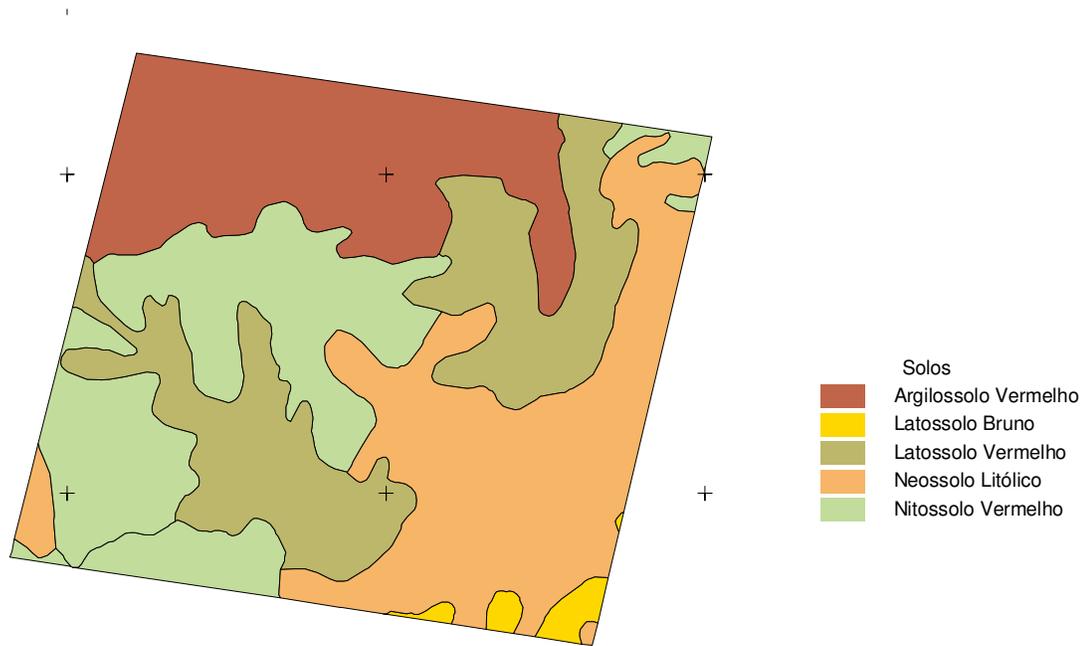


Figura 11. Estado do Paraná e os municípios cobertos pela cena Landsat 223/77.

A Figura 12 ilustra a caracterização dos solos na região coberta pela cena Landsat 223/77. O clima, segundo a classificação de Köppen é definido como subtropical, variação Cfa,

com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (IAPAR, 2005).



2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005. As características do sensor AVHRR foram descritas na Tabela 4.

3.1.3. Imagens de média resolução espacial

As áreas de soja foram determinadas por meio de imagens dos satélites Landsat 5 e 7. Foram utilizadas cenas da órbita-ponto 223/77, cujo exemplo é mostrado na Figura 13, entre os meses de novembro e fevereiro, nas três safras estudadas. A Tabela 5 mostra as datas das cenas utilizadas e a Tabela 6 exhibe as características dos sensores TM e ETM+, presente nestes satélites.

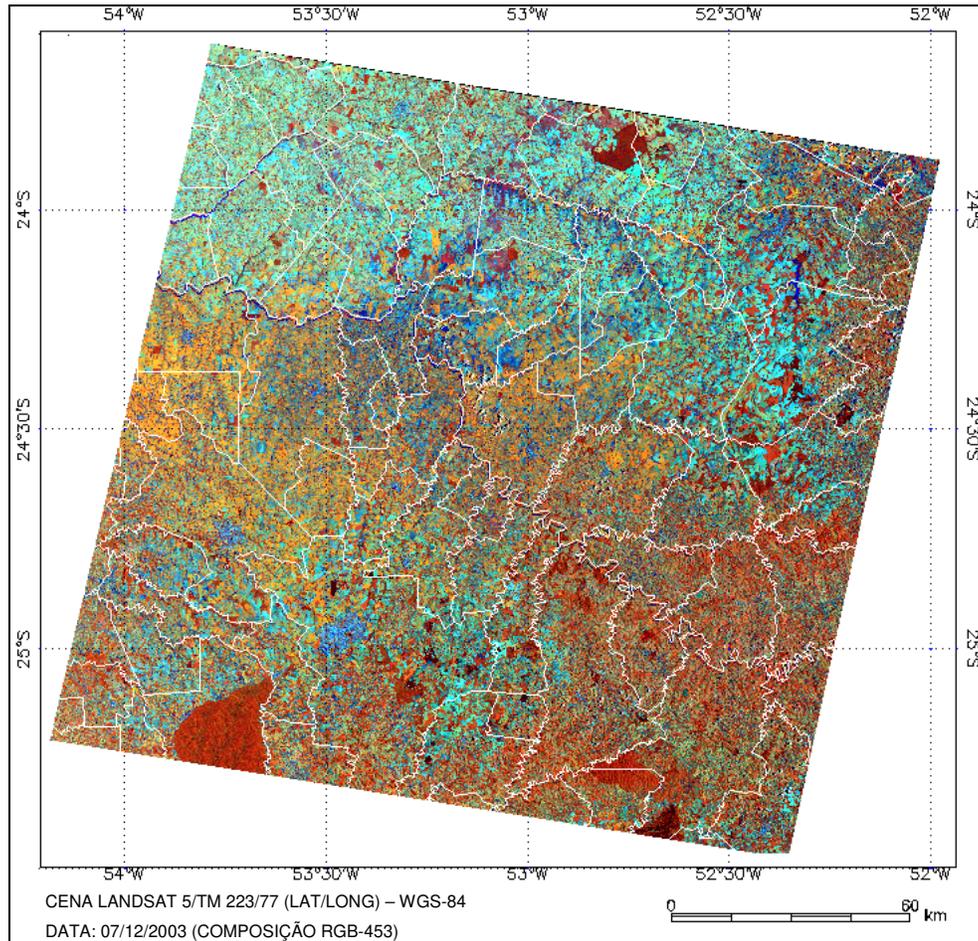


Figura 13. Composição colorida falsa cor RGB-453 da cena Landsat 5/TM 223/77 do dia 07/12/2003.

Tabela 5. Cenas Landsat utilizadas na geração das máscaras de soja.

| Safra | Datas adquiridas | Plataforma | Órbita-ponto |
|-----------|---|------------------|--------------|
| 2002/2003 | 28/12, 29/01 | Landsat 7 (ETM+) | 223/77 |
| 2003/2004 | 21/11, 07/12, 23/12, 24/01, 09/02, 25/02 | Landsat 5 (TM) | 223/77 |
| 2004/2005 | 23/11, 09/12, 25/12, 26/01, 11/02 | Landsat 5 (TM) | 223/77 |

Tabela 6. Características espectrais e espaciais do sensor TM e ETM+.

| Banda | Faixa Espectral (μm) | Região do Espectro | Resolução Espacial (m) |
|-------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0,45 a 0,52 | Azul | 30 |
| 2 | 0,52 a 0,60 | Verde | 30 |
| 3 | 0,63 a 0,69 | Vermelho | 30 |
| 4 | 0,76 a 0,90 | Infravermelho próximo | 30 |
| 5 | 1,55 a 1,75 | Infravermelho médio | 30 |
| 6* | 10,42 a 12,50 | Infravermelho Termal | 120 |
| 7** | 2,08 a 2,35 | Infravermelho médio | 30 |

* Valores para o sensor TM. Para o sensor ETM+, o canal 6 possui os mesmos valores do canal 7 do sensor TM.

** Valores para o sensor TM. Para o sensor ETM+, o canal 7 abrange a faixa entre 0,52 e 0,90 μm , com resolução espacial de 15 metros. Fonte: USGS (2004)

3.1.4. Dados estatísticos de produtividade da soja dos municípios estudados e dados meteorológicos

As estatísticas agrícolas oficiais, em nível municipal, foram obtidas junto ao Departamento de Economia Rural da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado do Paraná (SEAB/DERAL). No Anexo 1 estão listados os dados referentes aos 70 municípios cobertos pela cena Landsat 223/77, nas três safras estudadas. As Figuras 14, 15 e 16 ilustram os dados espacializados de área colhida, produção, e produtividade para todo o estado do Paraná.

Os dados meteorológicos utilizados no trabalho foram obtidos do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO, 2006).

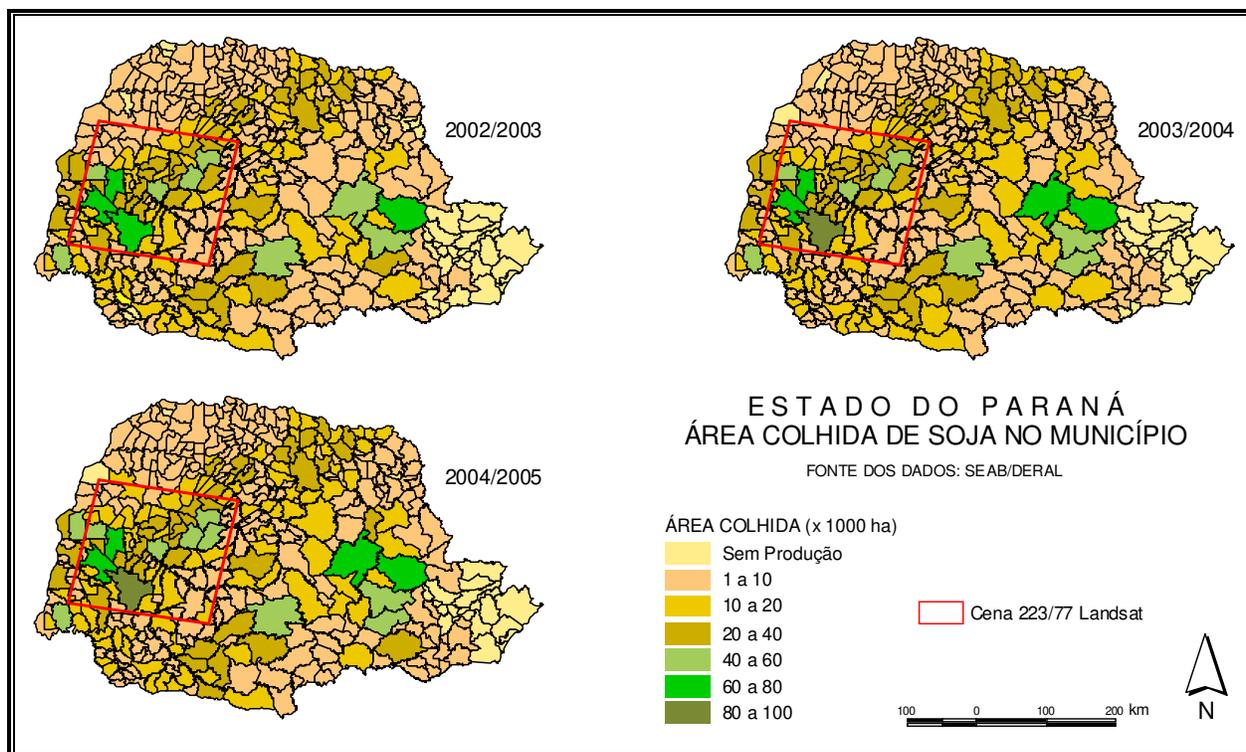


Figura 14. Área colhida de soja nos municípios do Estado do Paraná, nas três safras analisadas.

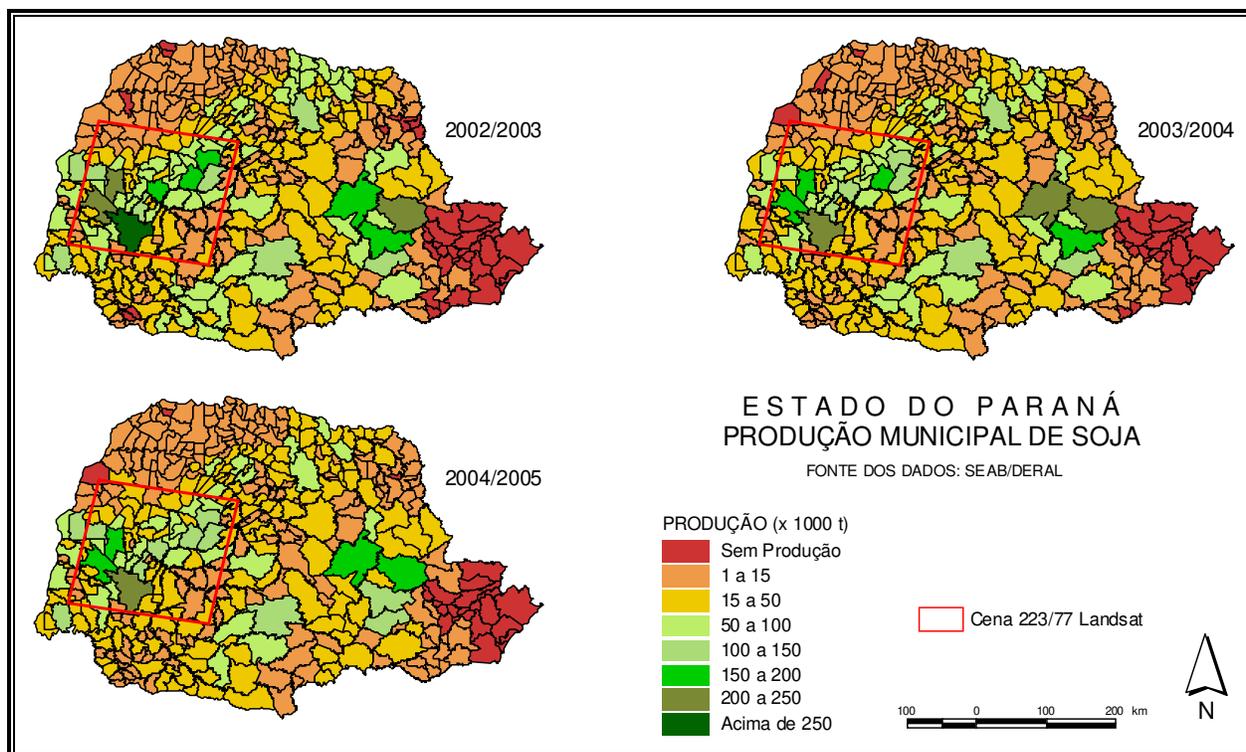


Figura 15. Produção de soja nos municípios do Estado do Paraná, nas três safras analisadas.

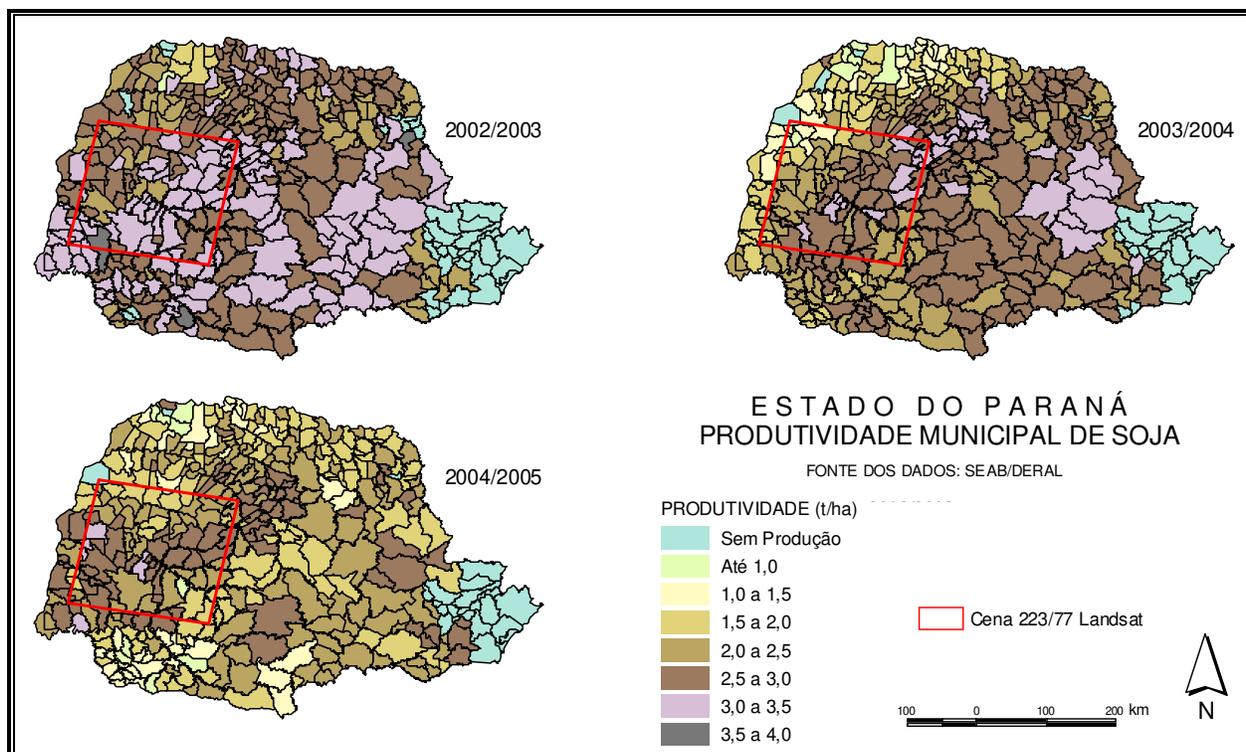


Figura 16. Produtividade de soja nos municípios do Estado do Paraná, nas três safras analisadas.

3.1.5. Recursos computacionais para o processamento, visualização e tratamento dos dados e imagens

O processamento das imagens AVHRR/NOAA foi realizado por meio de um sistema automático baseado no pacote computacional NAV, desenvolvido por pesquisadores do *Colorado Center for Astrodynamics Research (CCAR), Aerospace Engineering Sciences*, da Universidade do Colorado, Boulder, EUA. O sistema é compatível com a plataforma Linux e realiza todo o processamento das imagens de forma automática, desde a conversão do formato bruto até a geração de produtos, como o NDVI. Os detalhes do desenvolvimento deste sistema serão descritos no item 3.2.1.

Para a visualização das imagens e dados foram utilizados os softwares ENVI 4.0 (*The Environment for Visualizing Images*) e ArcView GIS 3.2. Para o tratamento dos dados e análises estatísticas foram utilizados os programas Microsoft Excel e Statistica 5.5.

A linguagem de programação IDL (*Interactive Data Language*), versão 6.0, foi utilizada no desenvolvimento do sistema de processamento automático das imagens NOAA, assim como na construção do sistema para geração automática de perfis de NDVI.

As atividades foram realizadas em dois computadores Pentium 4, com CPU de 2,4 GHz, 512 de RAM e 80 GB de disco rígido, um com o sistema operacional Linux Fedora Red Hat 9.0 e outro com o Microsoft Windows 2000 Professional.

3.2. Métodos

A Figura 17 mostra um fluxograma simplificado da pesquisa realizada neste trabalho. Para sua execução, foi necessário o desenvolvimento de dois sistemas automáticos, de forma a garantir a infra-estrutura necessária ao processamento e tratamento de uma grande quantidade de imagens e dados delas extraídos. Os sistemas automáticos para processamento das imagens NOAA e para geração dos perfis temporais são descritos a seguir.

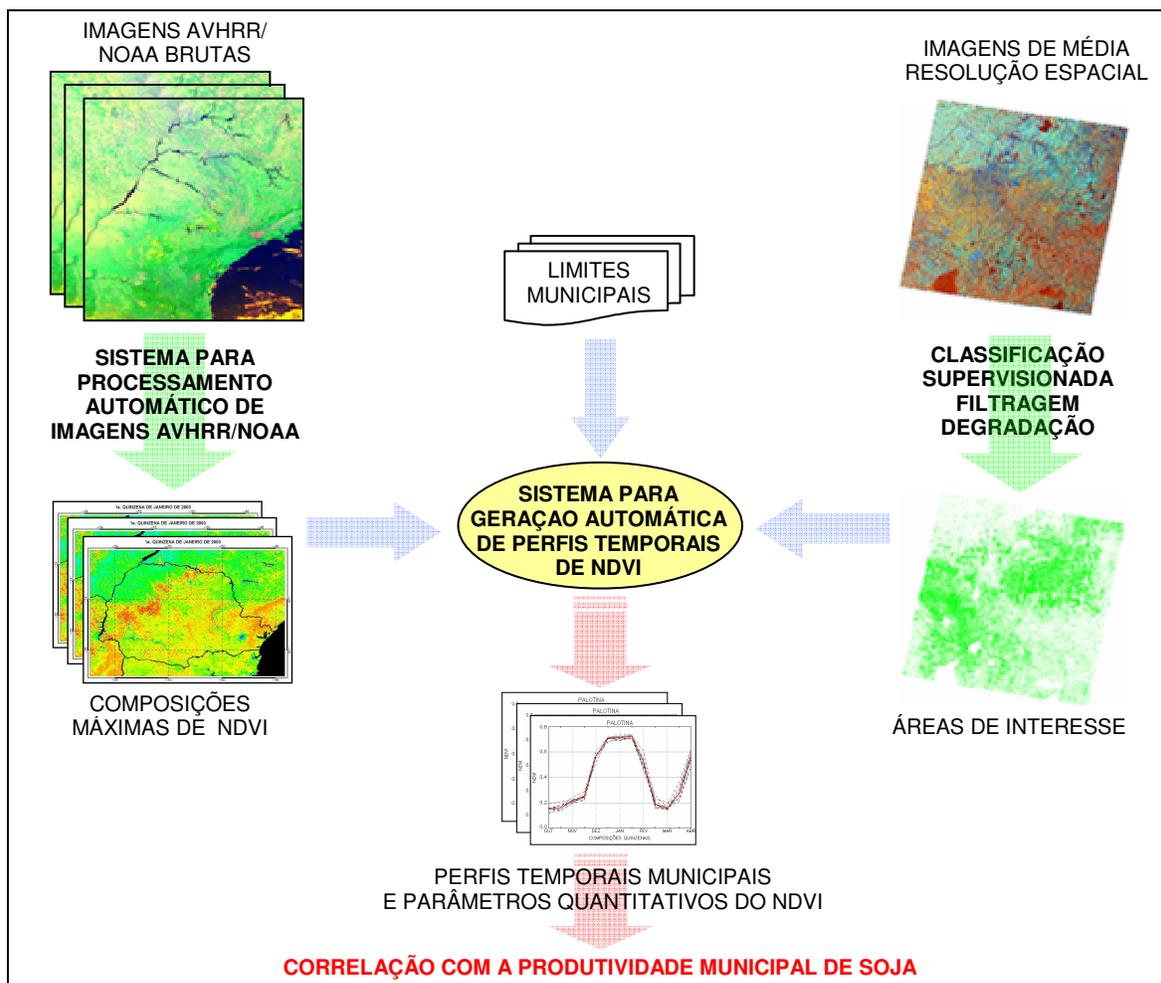


Figura 17. Fluxograma do sistema para monitoramento regional da cultura da soja.

3.2.1. Sistema automático de processamento das imagens AVHRR/NOAA

O desenvolvimento do sistema automático de processamento das imagens NOAA foi iniciado a partir de contatos com os pesquisadores William Emery e Daniel G. Baldwin, do CCAR da Universidade do Colorado, que iniciaram o repasse do pacote NAV. O pacote foi desenvolvido em linguagem C e é composto por uma série de módulos individuais, sendo os principais aqueles que têm por função a calibração radiométrica e a correção geométrica precisa e automática das imagens. Aqui, entende-se como precisão geométrica o deslocamento máximo de um pixel. A partir daí, em parceria com o então aluno de mestrado da FEAGRI/UNICAMP, João Francisco Gonçalves Antunes, deu-se início ao desenvolvimento de um sistema para interligar os diversos módulos presentes no pacote NAV, além da inclusão de rotinas para a geração de produtos derivados das imagens NOAA.

O sistema é executado por meio de um script *c-shell* (apresentado no Apêndice 7.1), que aciona os módulos de conversão de formatos, conversão radiométrica, georreferenciamento preciso e geração de produtos. A Figura 18 ilustra o fluxograma de funcionamento do sistema, cujas principais etapas serão descritas a seguir.

3.2.1.1. Conversão do formato bruto e correção de linhas faltantes

O processamento inicia-se com a conversão do formato bruto Telonics T-RIS (HRPT) ou LIB para um formato genérico, denominado CCAR, compatível com os passos subseqüentes. Em seguida, é executado um aplicativo que corrige as linhas faltantes da imagem, ocasionadas por falhas na recepção, por meio de interpolações das linhas vizinhas. Essa correção, que é feita por interpolação das linhas vizinhas, é sempre recomendável e aumenta a precisão do georreferenciamento, uma vez que o método de navegação utilizado requer seis linhas por segundo.

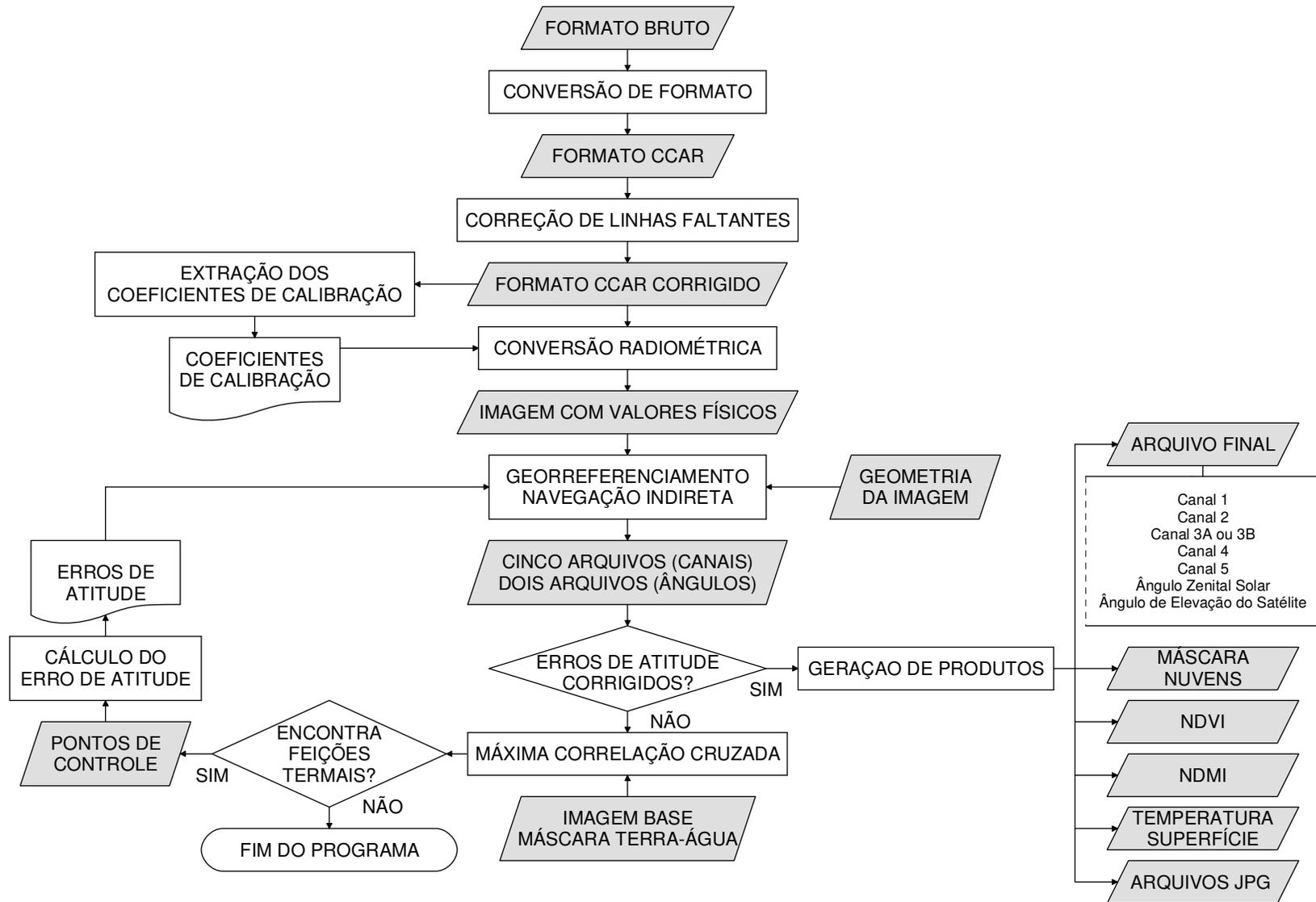


Figura 18. Fluxograma do sistema automático de processamento das imagens NOAA.

3.2.1.2. Conversão radiométrica

O processo de conversão radiométrica é responsável pela transformação do valor digital (nível de cinza) em radiância ou reflectância aparente (no topo da atmosfera) para os canais 1, 2 e 3A e em temperatura de brilho ou radiância para os canais 3B, 4 e 5. Os procedimentos de conversão radiométrica utilizados pelo sistema seguem as metodologias propostas por GOODRUM et al. (2001) e RAO e CHEN (1996), para o sensor AVHRR/3, presente a partir do NOAA-15.

Canais 1, 2 e 3A (reflectância)

A metodologia de calibração de um dado canal i dá origem a dois valores de albedo, alto e baixo. A soma desses dois valores resulta no valor de albedo total para o canal, conforme as equações de RAO e CHEN (1996):

$$\text{Albedo}_i \text{ baixo} (\%) = \rho^2 [S_{i,\text{baixo}} \times C_{i,\text{baixo}} + I_{i,\text{baixo}}] \quad (1)$$

$$\text{Albedo}_i \text{ alto} (\%) = \rho^2 [S_{i,\text{alto}} \times C_{i,\text{alto}} + I_{i,\text{alto}}] \quad (2)$$

$$\text{Albedo}_i (\%) = \text{Albedo}_i \text{ baixo} + \text{Albedo}_i \text{ alto} \quad (3)$$

Onde,

ρ^2 = fator de correção da distância Terra-Sol;

$S_{i,\text{baixo}}$ = coeficiente *slope* baixo do canal i ($\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})/\text{DN}$);

$I_{i,\text{baixo}}$ = coeficiente *intercept* baixo do canal i ($\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$);

$C_{i,\text{baixo}}$ = valor digital de cada pixel da imagem do canal i , no intervalo de 0 a 500.

$S_{i,\text{alto}}$ = coeficiente *slope* alto da banda i ($\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})/\text{DN}$);

$I_{i,\text{alto}}$ = coeficiente *intercept* alto da banda i ($\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$);

$C_{i,\text{alto}}$ = valor digital de cada pixel da imagem da banda i , no intervalo de 501 a 1023.

Os valores de *slope* e *intercept* altos e baixos são calculados em função do tempo do satélite em órbita e atualizados periodicamente pela NOAA em sua página na Internet (NOAASIS, 2004).

Canais 3B, 4 e 5 (termais)

Para o caso dos canais termais, os valores digitais da imagem são convertidos em radiância pelo modelo linear da Equação 4, conforme GOODRUM et al. (2001).

$$R_{i,lin} = S_i \times C_i + I_i \quad (4)$$

Onde,

$R_{i,lin}$ = radiância da banda i obtida de forma linear (%);

S_i = coeficiente *slope* da banda i ($mW/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})/ND$);

I_i = coeficiente *intercept* da banda i ($mW/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$);

C_i = ND da banda i.

Os valores de S_i e I_i são obtidos por meio de medições realizadas na própria plataforma orbital, em alvos da superfície terrestre e em um alvo interno de referência, com radiância conhecida. Tais coeficientes são gravados na imagem e extraídos por um módulo do NAV, conforme mostrou a Figura 18. Em seguida, os dados de radiância devem ser submetidos a um procedimento de correção que considera a não-linearidade entre os sinais produzidos pelo sensor, o que é feito por meio da Equação (5):

$$R_i = a_0 + a_1 \times R_{i,lin} + a_2 \times (R_{i,lin})^2 \quad (5)$$

Onde,

R_i = radiância da banda i corrigida de forma não-linear ($W/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$);

a_0, a_1 e a_2 = coeficientes presentes em cada linha do arquivo de imagem.

Para a conversão da radiância medida pelo canal i em temperatura de brilho, é utilizada a equação Inversa da Radiação de Planck (6):

$$T_i = \frac{C_2 \nu_i}{\ln\left(1 + \frac{C_1 \nu_i^3}{R_i}\right)} \quad (6)$$

Onde,

T_i = temperatura de brilho estimada da superfície da banda i (K);

ν_i = valor central do comprimento de onda do canal i (cm^{-1});

$C_1 = 1,1910427 \times 10^{-5} \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4})$;

$C_2 = 1,4387752 \text{ cm} - \text{K}$.

Por fim, deve ser realizado um ajuste para o cálculo da temperatura de brilho efetiva:

$$T_{Ei} = \frac{T_i - A}{B} \quad (7)$$

Na qual,

T_{Ei} = temperatura de brilho efetiva da superfície do canal i (K);

A, B = coeficientes de ajuste da temperatura de brilho das bandas 3B, 4 e 5 que podem ser obtidos no manual do usuário de dados NOAA/KLM (GOODRUM et al., 2001).

3.2.1.3. Georreferenciamento das imagens

O processo de correção geométrica utiliza os métodos da navegação indireta e da estimativa dos erros de atitude do satélite, ambos descritos por ROSBOROUGH et al. (1994). A navegação indireta é o processo que referencia um ponto geográfico da superfície da Terra ao pixel que o contém. A geração de uma imagem por meio da navegação indireta inicia-se com a definição da geometria da imagem (dimensões, resolução espacial, projeção geográfica e coordenada central). A partir daí, a navegação indireta é utilizada para relacionar cada pixel da imagem ao seu correspondente valor digital medido pelo sensor. Este método leva em conta, além das coordenadas em Terra, a posição, velocidade e atitude da plataforma orbital. Este último fator é responsável pela maior parte dos erros de georreferenciamento (EMERY et al., 1989). Quando os parâmetros de atitude (*roll*, *yaw* e *pitch*) são conhecidos, eles podem ser levados em consideração pelo método, aumentando a acurácia geométrica das imagens de saída. De acordo com o que foi apresentado na Figura 18, os erros de atitude ainda não são conhecidos na primeira navegação indireta executada pelo sistema, resultando em imagens que podem apresentar erros de georreferenciamento.

Para obtenção da acurácia geométrica desejada, o processo de navegação indireta das imagens necessita ser repetido, porém considerando-se os erros de atitude da iteração anterior. O

cálculo destes erros, também descrito por ROSBOROUGH et al. (1994), faz uso de pontos de controle coletados na imagem resultante da primeira navegação e uma base cartográfica precisa. São necessários apenas dois pontos de controle, embora geralmente sejam utilizados mais pontos para o cálculo dos parâmetros de atitude. Para permitir a total automatização do processo de georreferenciamento, o sistema aqui apresentado adotou a técnica da Máxima Correlação Cruzada (MCC) (EMERY et al., 2003) para a coleta automática dos pontos de controle necessários ao cálculo dos erros de atitude. A MCC é aplicada para detectar os deslocamentos geográficos entre uma imagem base (com alta precisão geométrica) e uma imagem alvo. A técnica utiliza uma janela de busca entre as duas imagens, tentando detectar feições termais comuns em ambas, como mostra a Figura 19. Aqui, a comparação foi feita entre uma imagem base do Estado do Paraná e uma das imagens dos canais termais resultantes da primeira navegação indireta. Uma vez encontrada uma feição semelhante entre essas duas imagens, são calculados os vetores de deslocamento desta feição (em termos de latitude e longitude), dando origem ao ponto de controle.

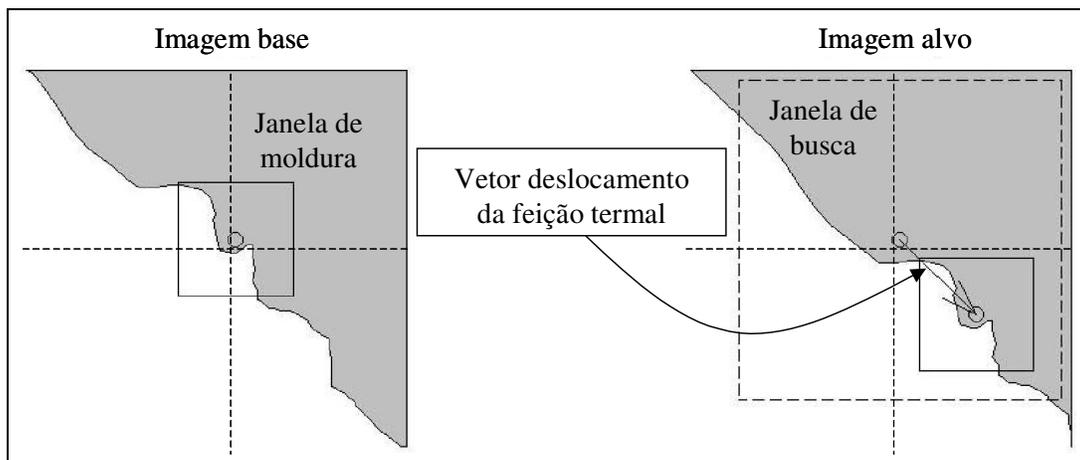


Figura 19. Método da MCC aplicado em duas imagens.

Fonte: Adaptado de EMERY et al. (2003)

Na MCC são utilizadas imagens dos canais termais porque as feições de temperatura são mais estáveis ao longo do tempo. As feições nos canais refletidos são mais fortemente influenciadas por mudanças da vegetação e por condições de iluminação diferentes. Além disso, canais termais podem ser utilizados tanto de dia, como de noite. No processo da MCC é aplicado um filtro de nuvens tanto na imagem alvo, como na imagem base, para evitar a sua influência na

busca por feições termais. É aplicada também uma máscara terra-água, evitando a busca por feições sobre grandes corpos d'água.

Uma vez conhecidos os erros de atitude, a navegação indireta é realizada novamente, desta vez considerando a imprecisão dos ângulos dos eixos do satélite no momento da passagem. Como resultado, são gerados sete arquivos, sendo um para cada canal espectral e dois contendo os ângulos zenitais de elevação e os ângulos de elevação do satélite.

Elaboração da imagem base

A imagem base é fundamental para o sucesso do processo automático de georreferenciamento das imagens AVHRR/NOAA, devendo apresentar elevada precisão geométrica. A geração da imagem base é semelhante à geração de qualquer imagem, com a diferença que a coleta de pontos de controle não é feita pela MCC, mas manualmente, tomando-se como referência arquivos vetoriais de malhas hidrográficas e regiões costeiras. Conforme mencionado anteriormente, são necessários somente dois pontos de controle, que devem ser coletados de maneira precisa, isto é, com erros menores que um quilômetro.

Para não haver restrições à janela de busca da MCC, a imagem base deve ter o mínimo de nuvens possível e estar próxima ao nadir. Porções das imagens tomadas com ângulos distantes do nadir não são recomendadas na busca por feições pela MCC, pois os pixels dessas regiões representam extensas áreas em terra. Outra característica das imagens base é que elas devem ser temporalmente próximas às imagens alvos, sendo recomendado uma imagem base para cada estação do ano. A utilização de uma imagem base distante da época da imagem alvo pode resultar em falhas na coleta de pontos de controle, por se tratarem de imagens com gradientes de temperatura diferentes.

3.2.1.4. Geração de produtos AVHRR/NOAA

A etapa de geração de produtos, ilustrada anteriormente na Figura 18, é composta por um conjunto de rotinas desenvolvidas em linguagem IDL, detalhadas na Figura 20. Uma rotina IDL principal faz a leitura dos sete arquivos gerados pelo pacote NAV até então. A partir daí, essa rotina aciona as rotinas secundárias, responsáveis por diferentes funções. O objetivo deste processo, além de gerar os produtos, é o de tornar os arquivos gerados pelo NAV compatíveis aos

principais softwares de processamento digital disponíveis, como o ENVI, por exemplo. A seguir, é feita uma breve descrição das funções de cada rotina.

mod_nav: módulo principal, verifica a presença dos arquivos gerados pelo NAV e carrega os arquivos encontrados. Aciona as rotinas secundárias e transforma em arquivo em disco as matrizes produzidas por elas. (Apêndice 7.2).

mod_cab: módulo de leitura de cabeçalho. Os arquivos gerados pelo NAV apresentam informações codificadas na primeira linha da imagem, que são extraídas por essa sub-rotina e utilizadas nos outros módulos. (Apêndice 7.3).

mod_cal: responsável pela leitura das bandas calibradas. Converte a ordem dos bytes das imagens. Transforma arquivo de ângulos de elevação em ângulos de varredura. Nomeia as bandas de saída. Retorna os arquivos em uma única matriz. (Apêndice 7.4).

mod_nuv: gera a máscara de nuvens utilizando-se uma combinação para satisfazer os critérios das Equações 8 a 10 descritos por FRANÇA e CRACKNELL (1995) e por CHEN et al. (2002). O método é baseado no valor de um dado pixel nos canais 1, 2, 4 e 5. (Apêndice 7.5).

$$1^{\circ}. \text{ critério: } \rho_{\text{VER}} > 15\% \quad (8)$$

$$2^{\circ}. \text{ critério: } 0,8 \leq \frac{\rho_{\text{IVP}}}{\rho_{\text{VER}}} \leq 1,6 \text{ e } T_4 < 270 \text{ K} \quad (9)$$

$$3^{\circ}. \text{ critério: } T_5 < 280 \text{ K} \quad (10)$$

Onde,

ρ_{VER} = reflectância no vermelho (%) – canal 1;

ρ_{IVP} = reflectância no infravermelho próximo (%) – canal 2;

T_4 = temperatura de brilho no canal 4 (K);

T_5 = temperatura de brilho no canal 5 (K).

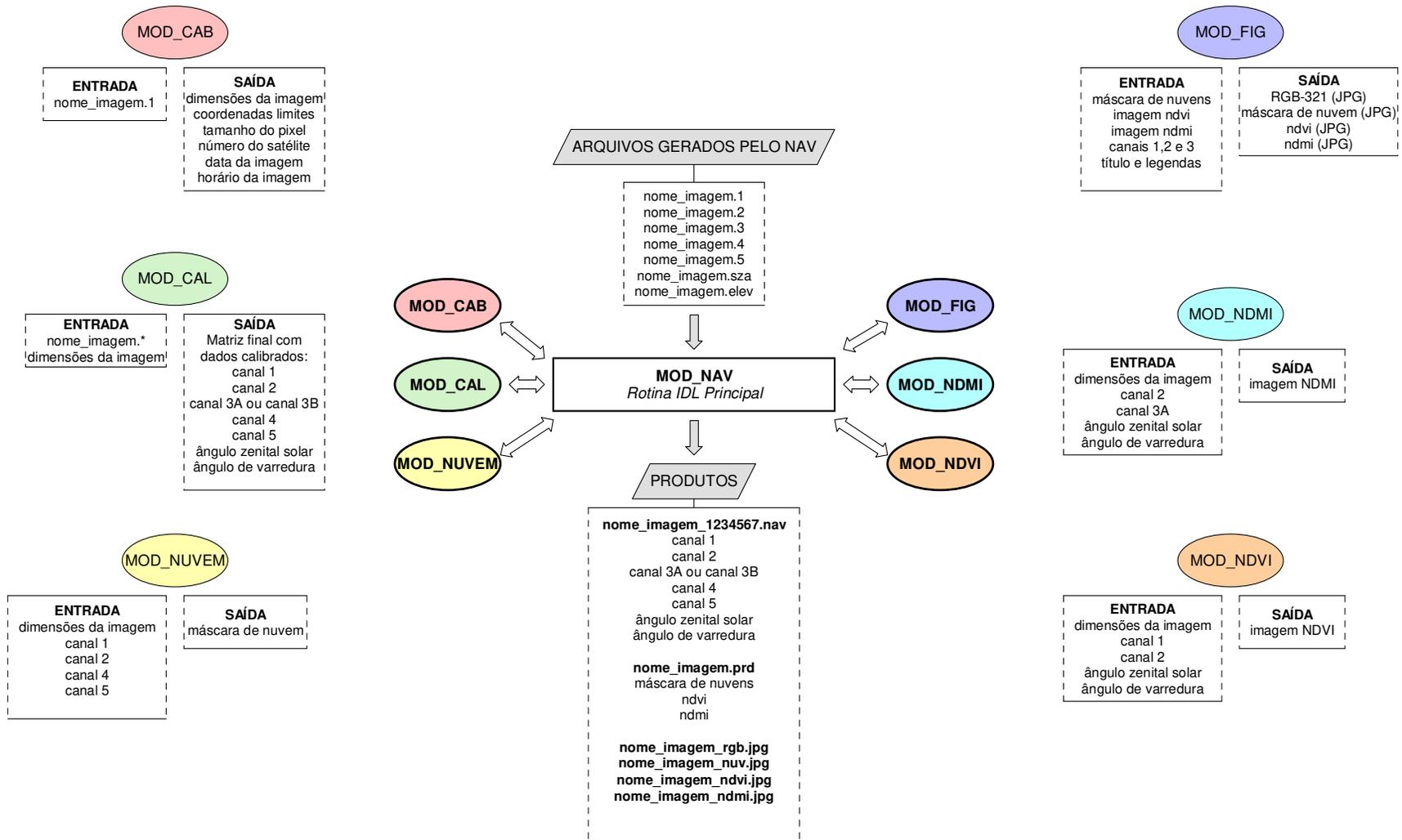


Figura 20. Esquematização das rotinas IDL desenvolvidas para geração dos arquivos de saída.

mod_ndvi e **mod_ndmi**: geram os índices espectrais NDVI e NDMI, obtidos por meio das Equações (11) e (12). Seguindo as recomendações de HOLBEN (1986) e CHEN et al. (2003), em ambos os índices foram excluídos os pixels com ângulo zenital solar maior que 70° e ângulos de varredura maiores que 42°, que receberam o valor -1.1. (Apêndices 7.6 e 7.7).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{VER}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{VER}}} \quad (11)$$

$$\text{NDMI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{IVM}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{IVM}}} \quad (12)$$

Onde,

ρ_{IVM} = reflectância no infravermelho médio (%).

mod_fig: gera imagens no formato JPEG (*Joint Pictures Expert Group*), contendo informações da imagem (data, hora, satélite), sobrepostas por uma grade de coordenadas e por uma malha vetorial do IBGE. (Apêndice 7.8).

Como saídas, a rotina principal **mod_nav** apresenta os arquivos descritos na Tabela 7. As imagens de saída têm 750 colunas por 512 linhas, centradas no Estado do Paraná (24°30'S e 51°18'W) e projeção cilíndrica eqüidistante.

Uma vez processadas as imagens diárias, foram elaboradas as composições de valor máximo, utilizando-se a rotina IDL apresentada no Apêndice 7.9. Foi adotado o período de 15 dias entre as composições, em virtude do excesso de nebulosidade nos períodos analisados, como será discutido com mais detalhes nos Resultados.

3.2.2. Sistema para geração automática dos perfis temporais de NDVI

O sistema para geração automática dos perfis temporais de NDVI foi desenvolvido em linguagem IDL e requer três dados de entrada:

- 1) A série multi-temporal de imagens (composições máximas de NDVI);
- 2) As coordenadas geográficas das áreas de interesse (áreas de soja);
- 3) Os municípios de interesse.

Tabela 7. Descrição dos arquivos gerados pelo sistema de processamento das imagens NOAA.

| Arquivo | Bandas | Descrição |
|--|---|--|
| nome_imagem_1234567.nav ¹ | 1) Canal 1 – Reflectância aparente (%) 2) Canal 2 – Reflectância aparente (%) 3) Canal 3A – Reflectância aparente (%) ou Canal 3B – Temperatura de brilho (K) 4) Canal 4 – Temperatura de brilho (K) 5) Canal 5 – Temperatura de brilho (K) 6) Ângulo zenital solar (graus) 7) Ângulo de varredura do sensor (graus) | Canais processados e ângulos, no formato ENVI. |
| nome_imagem.prd ¹ | 1) Máscara de nuvens (binária) 2) NDVI (flutuante, entre -1 e +1) 3) NDMI (flutuante, entre -1 e +1) | Arquivo de produtos no formato ENVI. |
| nome_imagem_rgb.jpg nome_imagem_nuv.jpg nome_imagem_ndvi.jpg Nome_imagem_ndmi.jpg | | Imagens no formato JPEG. |

¹ Acompanha arquivo de cabeçalho (*.hdr).

A determinação das áreas de soja e o funcionamento do sistema automático serão discutidos com mais detalhes nos itens a seguir.

3.2.2.1. Determinação das áreas de soja

Devido à baixa resolução espacial do sensor AVHRR/3, as coordenadas geográficas das áreas de soja foram extraídas utilizando-se imagens Landsat, com 30 metros de resolução. Na safra 2003/2004, tais áreas foram extraídas por GANAN et al. (2005), que classificaram as cenas Landsat 5/TM pelos métodos supervisionados paralelepípedo e máxima verossimilhança, utilizando apenas duas classes (soja/não soja). Em cada uma das cenas disponíveis ao longo da safra foram geradas imagens classificadas pelos dois métodos, sendo mais tarde reunidas em uma única imagem booleana, dando origem ao que foi denominado “máscara de soja”, como ilustra a Figura 21. A avaliação da acurácia da classificação foi conduzida por uma matriz de erros baseada em pontos amostrais visitados em campo, onde o valor do índice Kappa foi definido como “muito bom”, segundo os padrões definidos por LANDIS e KOCH (1977), que descrevem a avaliação da qualidade de classificação. Aqui, a mesma metodologia foi aplicada nas outras

duas safras, 2002/2003 (com imagens Landsat 7/ETM+) e 2004/2005 (com imagens Landsat 5/TM).

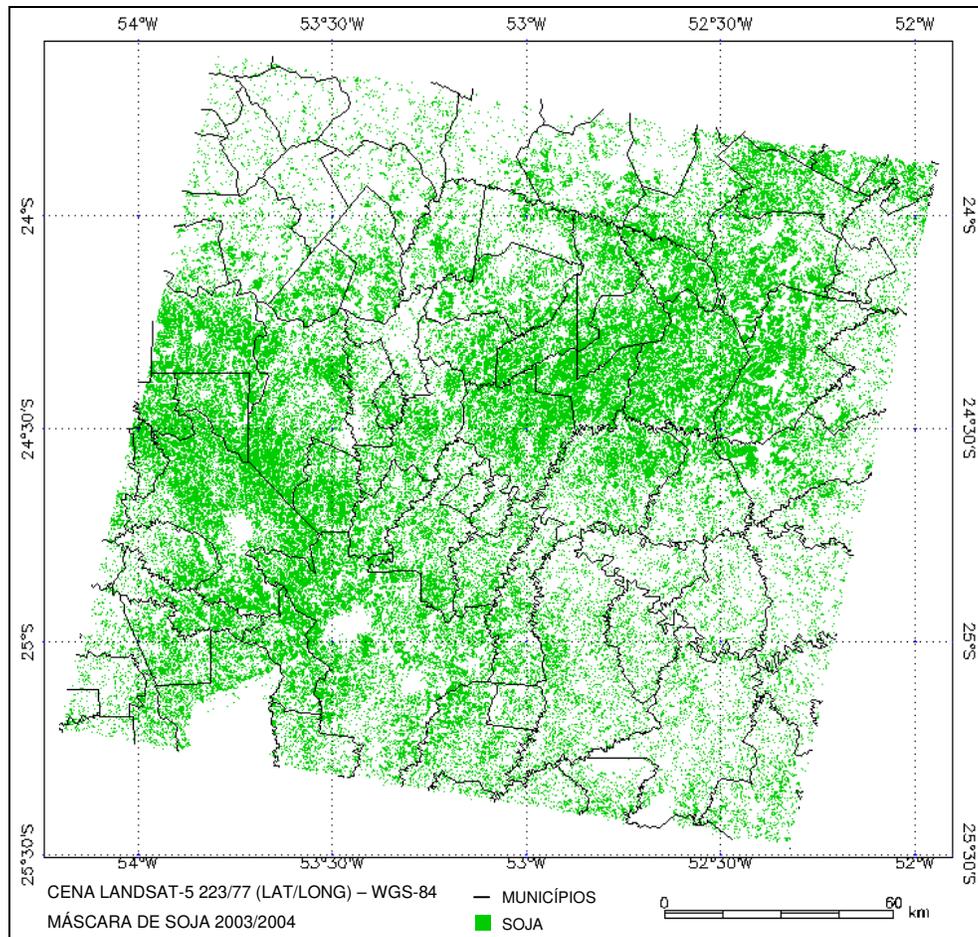


Figura 21. Máscara de soja da safra 2003/2004 (cena Landsat-5 223/77).

Fonte: Adaptado de GANAN et al. (2005).

Filtragem da máscara e extração das coordenadas das áreas produtoras

Para evitar que pequenas áreas de soja fossem analisadas na imagem NOAA, onde a mistura espectral é muito grande, foi efetuada uma filtragem na máscara de soja, de modo a compatibilizar a informação entre os dois sensores. A máscara foi degradada espacialmente com um filtro de convolução passa-baixas de dimensões 37 x 37 pixels, valor próximo à razão entre o tamanho do pixel NOAA (1100 m) e o tamanho do pixel Landsat (30 m).

Em seguida, a imagem foi reamostrada pelo método do vizinho mais próximo para o tamanho de 0,0098°, compatível com o pixel NOAA. O resultado foi uma imagem com valores entre 0 e 1, onde 1 representa pixels com maior concentração de áreas de soja e conseqüentemente menor mistura espectral. Foram então selecionados os pixels com valores entre 0,9 e 1, cujas coordenadas foram exportadas a um arquivo ASCII. A Figura 22 mostra um exemplo do efeito da filtragem e da reamostragem na determinação de áreas representativas de soja, onde os seis pixels selecionados na imagem reamostrada têm valores entre 0,9 e 1.

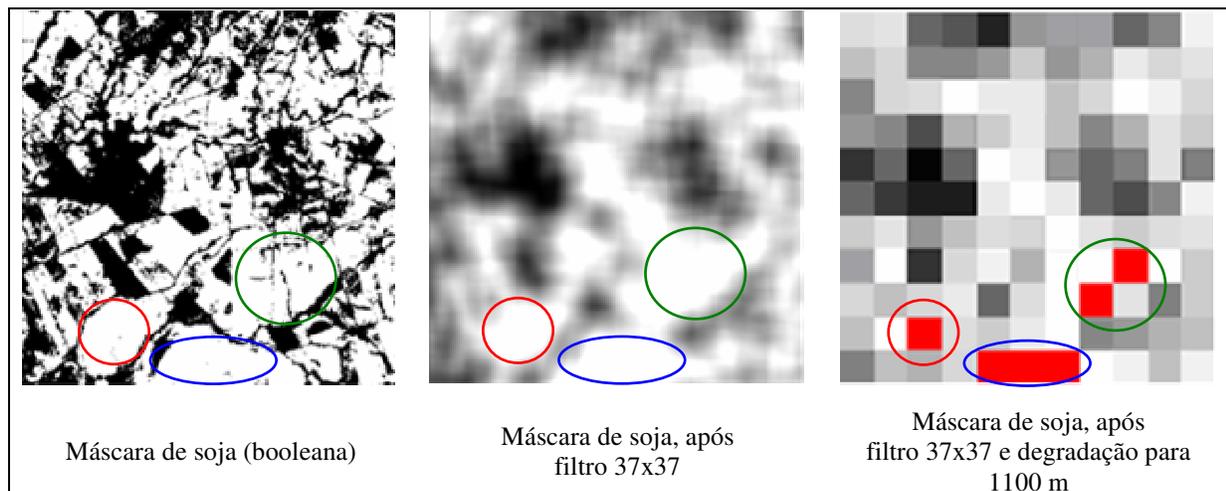


Figura 22. Efeitos da filtragem e reamostragem da máscara de soja para a seleção dos pixels com menor mistura espectral.

3.2.2.2. Funcionamento do sistema para geração automática dos perfis

A partir das coordenadas geográficas das áreas de soja, uma rotina IDL (presente no Apêndice 7.10) extraiu os dados da série multi-temporal em cada um dos municípios de entrada, produzindo saídas gráficas e tabulares. O fluxograma da Figura 23 apresenta os principais passos dessa rotina.

A rotina faz a leitura de um arquivo ASCII contendo um conjunto de n coordenadas das áreas de interesse. Em seguida, é lido um conjunto de m municípios, representados por uma imagem contendo seus limites territoriais. Assim, dado um município m_1 , a rotina verifica quais das n coordenadas estão presentes em seu interior. Se nenhuma área de soja for encontrada dentro do município m_1 , este é descartado e o próximo município (m_2) começa a ser analisado.

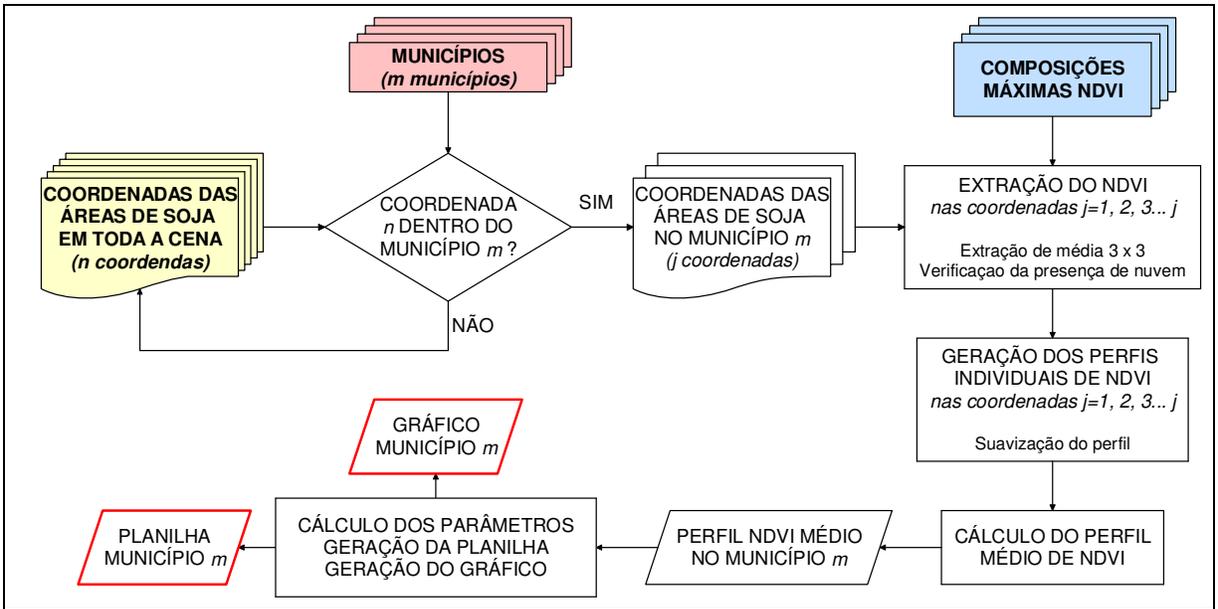


Figura 23. Fluxograma da rotina para geração dos perfis de NDVI.

Porém, se j coordenadas de soja estiverem presentes no interior do município m_1 , estas são separadas e armazenadas numa matriz. Supondo o par de coordenadas j_1 , a rotina faz a extração do NDVI a partir das 14 composições máximas quinzenais, entre os meses de outubro e abril. A coleta é feita a partir da média de uma janela 3 x 3 pixels, uma vez que os erros de georreferenciamento são de ± 1 km. Assim, os 14 valores coletados no par de coordenadas j_1 dão origem a um perfil individual. Em cada uma desses perfis, os valores marcados como nuvem foram eliminados, sendo substituídos pela média aritmética das composições anterior e posterior. Mudanças bruscas do valor de NDVI, ocasionadas principalmente por pixels contaminados por nuvens e não mascarados, foram eliminadas, de modo a produzir um perfil mais suavizado e com menos flutuações ocasionadas por fatores não relacionados à cultura.

A partir dos perfis individuais foi gerado um perfil médio, representando o comportamento do NDVI de todas as áreas de soja encontradas dentro de um dado município. A partir do perfil médio foram determinadas as datas próximas ao início e final do ciclo, o que foi feito tomando-se como base o pico vegetativo. O início do ciclo foi determinado pela composição de menor valor antes do pico vegetativo seguida por dois períodos de crescimento significativo. Já o fim do ciclo foi definido pela composição de menor valor após o pico vegetativo. A diferença entre as datas constitui a duração do ciclo. É importante ressaltar que este procedimento

determina as datas próximas ao início e final do ciclo, não sendo possível determinar com exatidão as datas reais devido à resolução temporal de 15 dias das composições de valor máximo.

Os parâmetros quantitativos foram calculados considerando todo o ciclo produtivo e partes dele. Os parâmetros calculados entre o início e o final do ciclo foram:

- Área integrada sob a curva (calculada por meio da aproximação trapezoidal)
- Somatório
- Valor médio
- Valor máximo
- Amplitude (diferença entre os valores máximo e mínimo)

Quando apenas partes do ciclo foram consideradas, os parâmetros calculados foram área integrada, somatório e valor médio. Os valores de NDVI e os parâmetros dele extraídos foram exportados para um arquivo de planilha, compatível com o Microsoft Excel. Por fim, para cada município, foi gerada uma saída gráfica com o perfil médio e os perfis individuais, em formato JPEG.

3.2.3. Correlação entre NDVI x produtividade oficial de soja

Utilizando os dados oficiais gerados pela SEAB/DERAL foi elaborada uma planilha com os valores de área colhida, produtividade e produção de soja de todos os 70 municípios presentes na área de estudo. Estes dados foram então cruzados com os valores de NDVI coletados nos municípios. A partir daí foi conduzida uma análise para determinar, por meio de regressão linear simples, a correlação entre os parâmetros quantitativos do NDVI extraídos nos municípios e a produtividade da soja. Os dados foram submetidos ao teste W de Shapiro-Wilk para verificação de sua normalidade. Os períodos analisados foram os seguintes:

- Período 1: início ao fim da safra
- Período 2: início até uma quinzena antes do fim do ciclo
- Período 3: início até duas quinzenas antes do fim do ciclo
- Período 4: início até três quinzenas antes do fim do ciclo

- Período 5: início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo
- Período 6: período do ciclo com valores de NDVI superiores a 0,30

É importante ressaltar que a análise dos perfis do NDVI e sua relação com a produtividade da soja foram baseadas em três pressupostos:

- 1 – Os pixels NOAA utilizados apresentaram baixa mistura espectral;
- 2 – O NDVI apresenta alta correlação com biomassa, que por sua vez apresenta alta correlação com a produtividade e;
- 3 – Os dados oficiais da SEAB/DERAL são confiáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do trabalho, descritos a seguir, foram divididos em três partes. As duas primeiras descrevem os resultados provenientes do desenvolvimento dos sistemas para a formação da infra-estrutura necessária à execução das análises multi-temporais. A terceira, e mais importante parte, descreve o resultado das correlações e regressões conduzidas ao longo das três safras, que permitiram avaliar o potencial dos perfis temporais do NDVI no monitoramento da cultura da soja.

4.1. O sistema para processamento das imagens AVHRR/NOAA

O desenvolvimento de um sistema automático de processamento de imagens se mostrou fundamental na condução das análises multi-temporais das imagens AVHRR/NOAA. Foram processadas 461 imagens brutas, considerando os sete meses (de outubro a abril) utilizados ao longo das três safras. Para determinação da qualidade das imagens de saída, foram definidos três níveis de processamento: G1, G2 e F, descritos a seguir.

Nível G1: nível mais alto de processamento, quando todas as etapas foram executadas e o número de vetores encontrado pela MCC foi superior a 10. Nesse caso, a correção geométrica foi otimizada, pois o cálculo dos erros de atitude tornou-se mais acurado.

Nível G2: todas as etapas foram executadas, porém o número de vetores encontrado pela MCC foi inferior a 10, diminuindo a acurácia no cálculo dos erros de atitude e resultando em erros de georreferenciamento superiores a um pixel. As imagens de saída foram nomeadas com o sufixo “NUD”.

Nível F: nível mais baixo de processamento, com falha em alguma das etapas. Insucesso da MCC na busca por pontos de controle, problemas de conversão de formatos e falhas de calibração radiométrica resultaram em imagens com este nível, cujos nomes foram acrescido com “FAL”.

A Tabela 8 apresenta o número de imagens brutas utilizadas em cada uma das safras e os níveis de processamento obtidos. Das 461 imagens brutas processadas, 209 (45,3%) apresentaram nível G1, 70 (15,2%) o nível G2 e 182 (39,5%) o nível F.

Tabela 8. Número de imagens brutas utilizadas em cada uma das safras e os níveis de processamento obtidos.

| Mês | Nível de Correção | SAFRAS | | |
|--------------|--------------------|------------|------------|------------|
| | | 2002/2003 | 2003/2004 | 2004/2005 |
| Outubro | G1 | 12 | 10 | 3 |
| | G2 | 5 | 3 | 0 |
| | F | 9 | 7 | 15 |
| | Total | 26 | 20 | 18 |
| Novembro | G1 | 10 | 9 | 8 |
| | G2 | 4 | 2 | 2 |
| | F | 7 | 13 | 15 |
| | Total | 21 | 24 | 25 |
| Dezembro | G1 | 4 | 8 | 10 |
| | G2 | 4 | 4 | 4 |
| | F | 9 | 18 | 11 |
| | Total | 17 | 30 | 25 |
| Janeiro | G1 | 5 | 8 | 7 |
| | G2 | 3 | 7 | 4 |
| | F | 4 | 5 | 14 |
| | Total | 12 | 20 | 25 |
| Fevereiro | G1 | 6 | 9 | 17 |
| | G2 | 7 | 2 | 5 |
| | F | 5 | 8 | 3 |
| | Total | 18 | 19 | 25 |
| Março | G1 | 10 | 13 | 23 |
| | G2 | 2 | 2 | 2 |
| | F | 6 | 6 | 3 |
| | Total | 18 | 21 | 28 |
| Abril | G1 | 14 | 8 | 15 |
| | G2 | 2 | 4 | 2 |
| | F | 5 | 10 | 9 |
| | Total | 21 | 22 | 26 |
| Total | Total G1 | 61 | 65 | 83 |
| | Total G2 | 27 | 24 | 19 |
| | Total F | 45 | 67 | 70 |
| | Total Geral | 133 | 156 | 174 |

G1 = Nível 1 de georreferenciamento.

G2 = Nível 2 de georreferenciamento.

F = Nível F (falha).

As imagens nível F, em sua maioria, apresentaram excesso de nuvens, prejudicando a busca por feições termais por meio da MCC. Nesses casos, somente a primeira navegação foi executada, pois a falta de pontos de controle não permitiu a correção dos erros de atitude necessários à segunda navegação. Nas imagens nível F, não foi garantido o erro máximo de um pixel, já que o modelo orbital não considerou os parâmetros de atitude na primeira navegação, fonte principal dos erros de georreferenciamento.

No caso das imagens nível G2, constatou-se que a reduzida quantidade de pontos de controle foi devida a duas causas: excesso de nuvens e passagens *off-nadir*. As nuvens diminuem a área de busca por pontos de controle, pois o pacote NAV não aplica a MCC em pixels contaminados. Já nas passagens com ângulos de varredura extremos, os pixels podem representar áreas de até 30 km², desfigurando os padrões termais, e prejudicando o trabalho da MCC. Também neste caso, não foi garantido o erro máximo de um pixel. Embora o algoritmo de ROSBOROUGH et al. (1994) necessite de apenas dois pontos de controle para a estimativa dos erros de atitude, pelo menos dez são necessários à MCC, pois os pontos de controle são filtrados para se obter os mais acurados em uma amostra mínima de dez pares.

Já no caso das imagens nível G1, os resultados mostraram que, quando livre de nuvens, as imagens puderam ser processadas automaticamente, gerando produtos calibrados e geometricamente acurados, com erros de, no máximo, um pixel, sem qualquer intervenção humana. A análise da qualidade do georreferenciamento foi conduzida pelo método visual e pelo cálculo do deslocamento relativo. Na análise visual foram sobrepostas à imagem malhas vetoriais políticas e hidrográficas, disponibilizadas pelo IBGE. A Figura 24 ilustra alguns exemplos do efeito da correção dos erros de atitude do satélite em feições geográficas conhecidas.

Somente com a primeira navegação, que não considera os erros de atitude, os deslocamentos entre o vetor em vermelho (que representa uma referência acurada) e a imagem foram grandes, chegando a dez pixels em alguns casos. A partir da inclusão dos erros de atitude no modelo orbital, tais deslocamentos caíram consideravelmente.

Outra forma utilizada para avaliar a acurácia do georreferenciamento foi o cálculo do deslocamento entre a imagem processada e a imagem base. Isso foi realizado aplicando-se novamente a MCC, desta vez utilizando como entradas a imagem já processada e a imagem base. Como resultado, obteve-se o deslocamento relativo entre as imagens, o que representou uma estimativa da qualidade do georreferenciamento final. Em outras palavras, este último passo

mostrou quão semelhante ficaram as imagens alvo e base do ponto de vista geométrico. A Figura 25 mostra a estimativa do deslocamento, em pixels, entre as 209 imagens nível G1 e as imagens base.

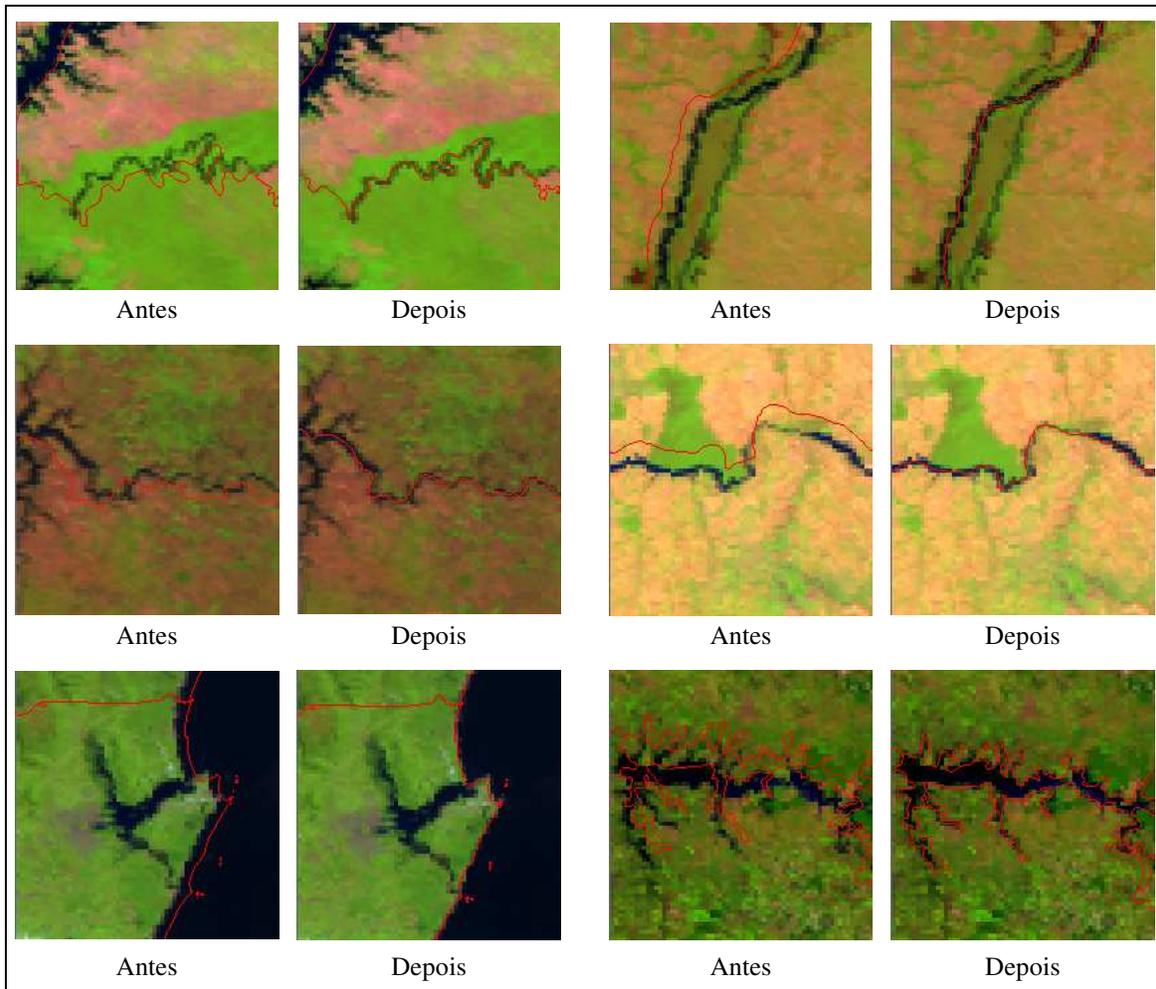


Figura 24. Georreferenciamento antes e depois da correção dos erros de atitude do satélite.

Verificou-se que 98% dos deslocamentos das 209 imagens nível G1 se mantiveram em até um pixel, erro aceitável para estudos terrestres. Quatro imagens apresentaram deslocamentos superiores a um pixel e, em todos os casos, a porcentagem de nuvens na imagem foi superior a 70%. Dessa forma, a MCC considerou uma área restrita de busca, cujos pontos de controle podem ter ficado limitados a uma pequena região da cena. De acordo com as conclusões de ROSBOROUGH et al (1994), melhores resultados no cálculo dos erros de atitude do satélite são obtidos quando os pontos de controles estão espalhados pela cena, o que não houve nestes casos.

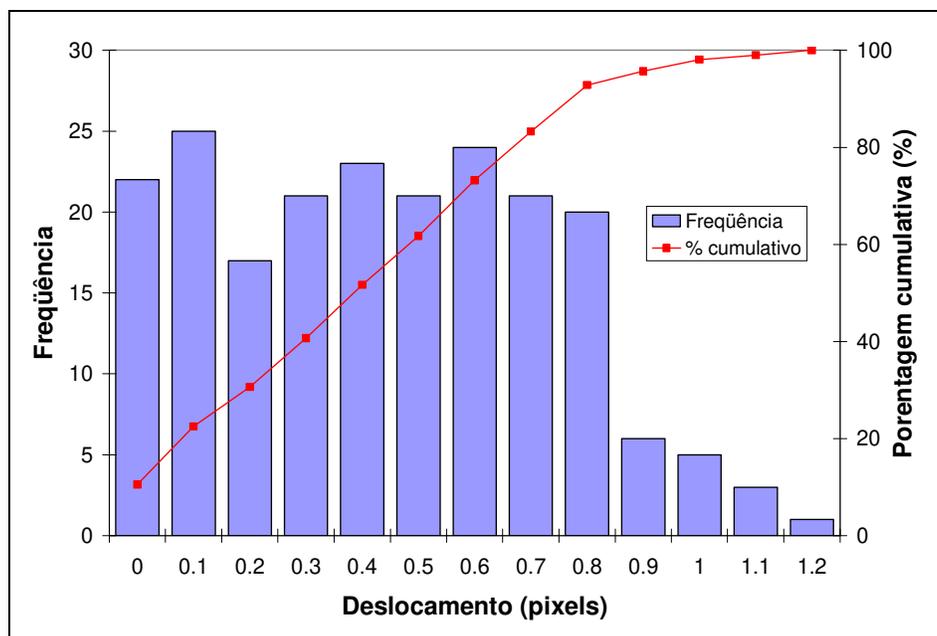


Figura 25. Histograma de frequências do deslocamento das 209 imagens nível G1 e sua porcentagem cumulativa.

Com base nesses resultados, somente as imagens com georreferenciamento preciso (até um pixel de erro) foram utilizadas na geração das composições de valor máximo, tendo sido eliminadas as imagens dos níveis G2 e F, além das quatro imagens nível G1 que extrapolaram o erro máximo permitido.

É importante ressaltar que a acurácia da correção geométrica das imagens processadas tende a se assemelhar à acurácia geométrica da imagem base. Portanto, a qualidade da imagem base é crucial para obtenção de imagens aptas ao monitoramento terrestre. Além de utilizar bases com alta acurácia geométrica, com poucas ou nenhuma nuvem e próximas ao nadir, um outro procedimento foi utilizar um conjunto de quatro imagens bases, distribuídas ao longo da série temporal, nas datas 09/11/2003, 10/12/2003, 28/02/2004 e 02/03/2004. Isto favoreceu o trabalho da MCC na busca de pontos de controle, pois as imagens alvo e base eram temporalmente próximas, reduzindo o efeito sazonal causado pelas mudanças térmicas. A proximidade temporal se aplica a imagens de anos diferentes, já que uma imagem base de um ano pode ser utilizada em outros anos, desde que pertencentes ao mesmo mês. Por exemplo, a base do dia 28/02/2004 foi utilizada para processar as imagens de fevereiro de 2003 e fevereiro de 2005. O importante é que imagens de um mês sejam processadas com bases do mesmo mês, ou de um mês próximo, mesmo que sejam de anos diferentes.

A título de exemplo, são mostrados a seguir alguns produtos gerados pelo sistema de processamento. A Figura 26 ilustra a imagem no formato JPEG da composição falsa cor RGB-321 do dia 29/03/2005, formada pelos canais do infravermelho médio (R), infravermelho próximo (G) e vermelho (B). Esta composição exalta a presença das nuvens e serviu como referência na determinação dos valores mais adequados utilizados no algoritmo de detecção de nuvens. Todas as informações presentes na imagem foram inseridas pelo sistema.

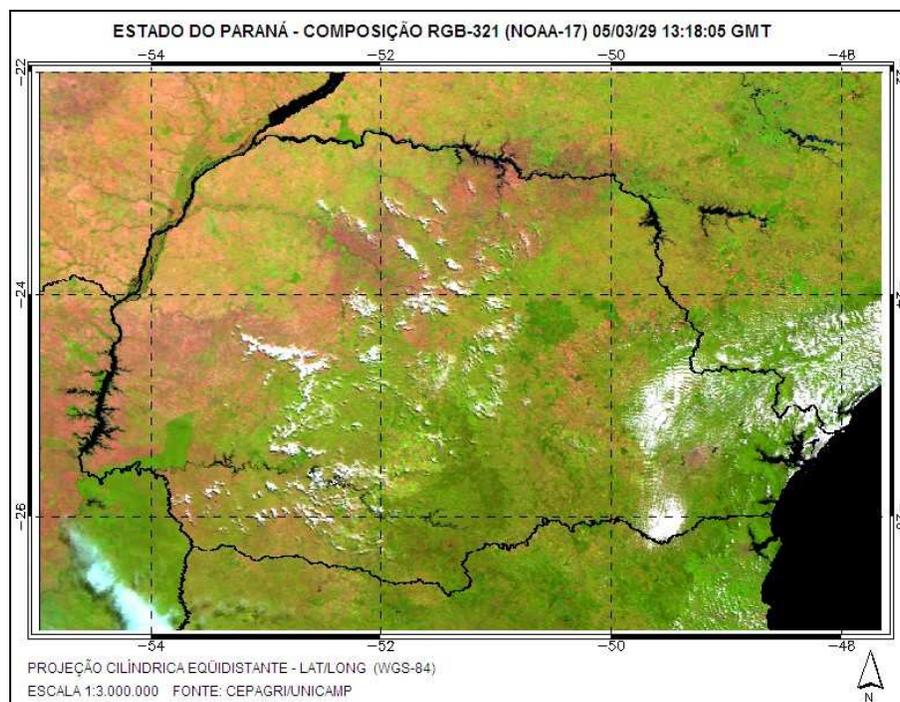


Figura 26. Composição falsa cor RGB-321 do dia 29/03/2005.

A Figura 27 mostra o mascaramento de nuvens gerado para esse mesmo dia. Os valores de detecção de nuvens propostos por FRANÇA e CRACKNELL (1995) e CHEN et al. (2002) não resultaram em mapeamentos eficientes, uma vez que foram desenvolvidos para regiões com condições climáticas diferentes do Paraná. De forma iterativa, os valores foram alterados até que se chegasse em detecções aceitáveis para a região.

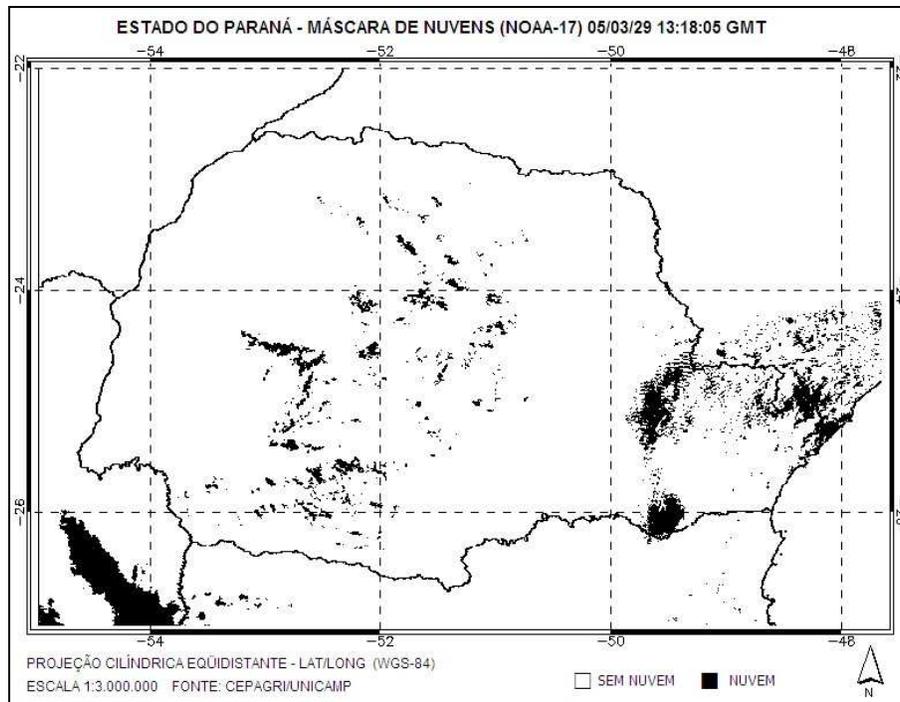


Figura 27. Máscara de nuvens do dia 29/03/2005.

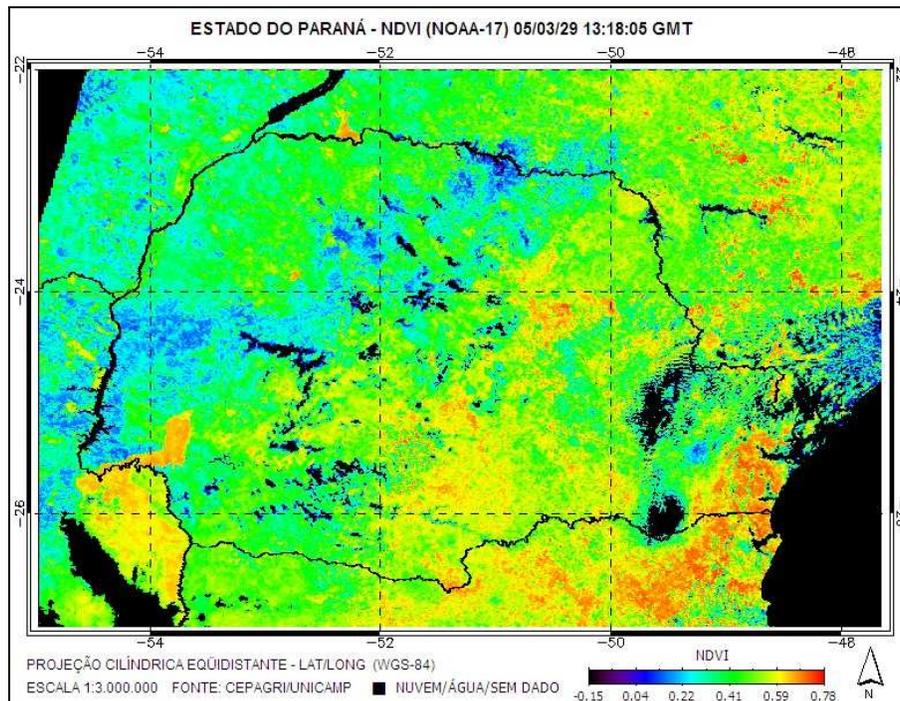


Figura 28. Imagem NDVI do dia 29/03/2005, com pixels inaptos mascarados.

A Figura 28 ilustra o NDVI do mesmo dia, com mascaramento dos pixel inaptos à análise do NDVI, ou seja, locais com nuvens e com ângulos de varredura acima de 42°, como se

observa no canto superior esquerdo. Abaixo da figura é mostrada uma escala de cores, distribuída de acordo com os valores mínimos e máximos encontrados na imagem.

A Figura 29 mostra a imagem do índice espectral NDMI, também com pixels inaptos mascarados. Embora não explorado neste trabalho, o NDMI apresenta potencial na análise da vegetação, conforme relataram JIN e SADER (2005). ANTUNES (2005) relatou que o NDMI pôde ser utilizado como uma das entradas em seu algoritmo de classificação *fuzzy*, melhorando as estimativas de área plantada de soja geradas por imagens NOAA.

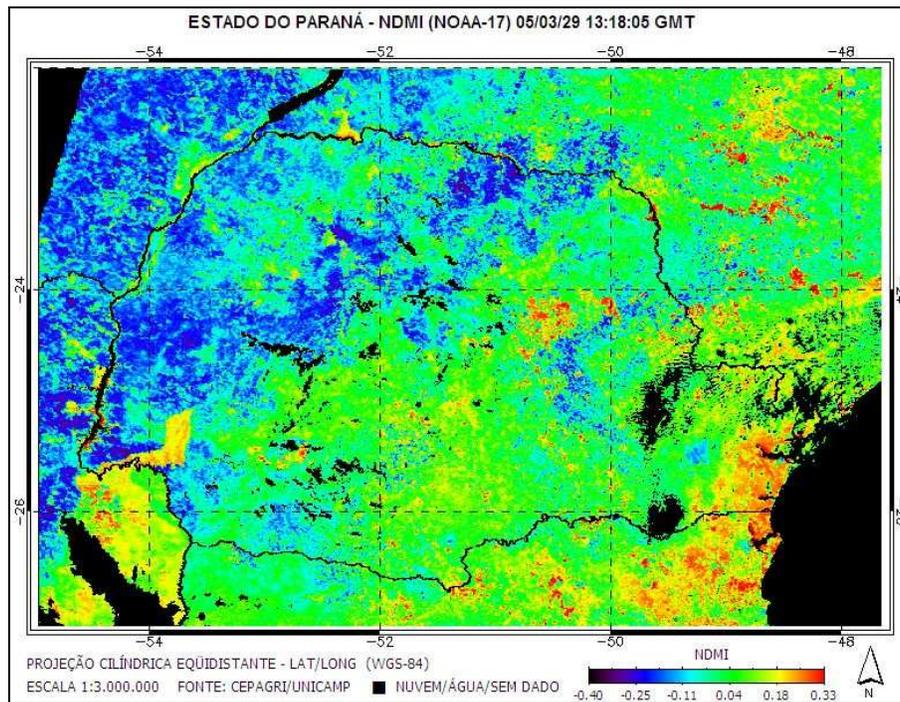


Figura 29. Imagem NDMI do dia 29/03/2005, com pixels inaptos mascarados.

O sistema desenvolvido, baseado na tecnologia repassada pelo CCAR – Colorado, mostrou-se eficiente e permitiu a total automação dos procedimentos, desde a conversão do formato bruto até a geração de produtos. Isso incluiu o georreferenciamento das imagens, cujos resultados mostraram ter sido plenamente automatizado pela navegação indireta aliada à busca automática de pontos de controle pela MCC.

O sistema vem sendo utilizado por alunos e pesquisadores da Unicamp no processamento das imagens AVHRR/NOAA para diversos fins, como estudos de correção atmosférica (NASCIMENTO, 2006), estimativa de área plantada de soja no Estado do Paraná

(ANTUNES, 2005), monitoramento de enchentes na região do Pantanal (ANTUNES e ESQUERDO, 2007), estimativa da temperatura de superfície para monitoramento de geadas (CARAMORI et al., 2007) e para a geração de modelos de previsão de chuvas (ÁVILA et al., 2007). Além do CEPAGRI, o sistema também foi posto em operação na Embrapa Informática Agropecuária, gerando produtos que vêm sendo publicados no Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO, 2006). A descrição do sistema com dados parciais foi publicada por ANTUNES (2005) e por ESQUERDO et al. (2006).

4.2. O sistema para geração automática dos perfis temporais de NDVI

O sistema desenvolvido para a geração automática dos perfis temporais de NDVI se mostrou uma ferramenta importante na análise do desenvolvimento da soja nos municípios monitorados, permitindo maior rapidez na aquisição da informação espectral de um número elevado de áreas produtoras. A Figura 30 ilustra um exemplo da saída gráfica do sistema para o município de Assis Chateaubriand, na safra 2003/2004. A Figura foi alterada, sendo incluídas informações sobre a fenologia da cultura, cuja duração das principais fases foi aproximada considerando-se um ciclo médio de 135 dias.

As linhas pontilhadas representam os perfis individuais dos 69 pixels classificados como áreas representativas de soja na imagem NOAA. A linha em vermelho representa o perfil médio do município que, neste caso, é bem próximo dos perfis individuais. Percebe-se que o comportamento do perfil temporal é típico de uma cultura anual, onde os valores de NDVI iniciam-se baixos, próximos aos patamares de solo exposto ou palhada. Na medida em que a planta cresce e ganha biomassa, o NDVI aumenta, até chegar ao pico vegetativo que, neste caso, ocorreu em meados de janeiro. A partir daí, a planta inicia o processo de maturação, perde vigor vegetativo e entra na fase de senescência, até que os valores de NDVI alcancem os patamares iniciais de solo exposto ou palhada, quando a colheita é feita. Neste exemplo, verifica-se que após o término do ciclo da soja, a curva do NDVI voltou a aumentar, representando o início de um novo ciclo produtivo. Neste caso, a segunda curva refere-se à presença do milho safrinha, conforme mostraram as estatísticas oficiais da SEAB/DERAL naquele município.

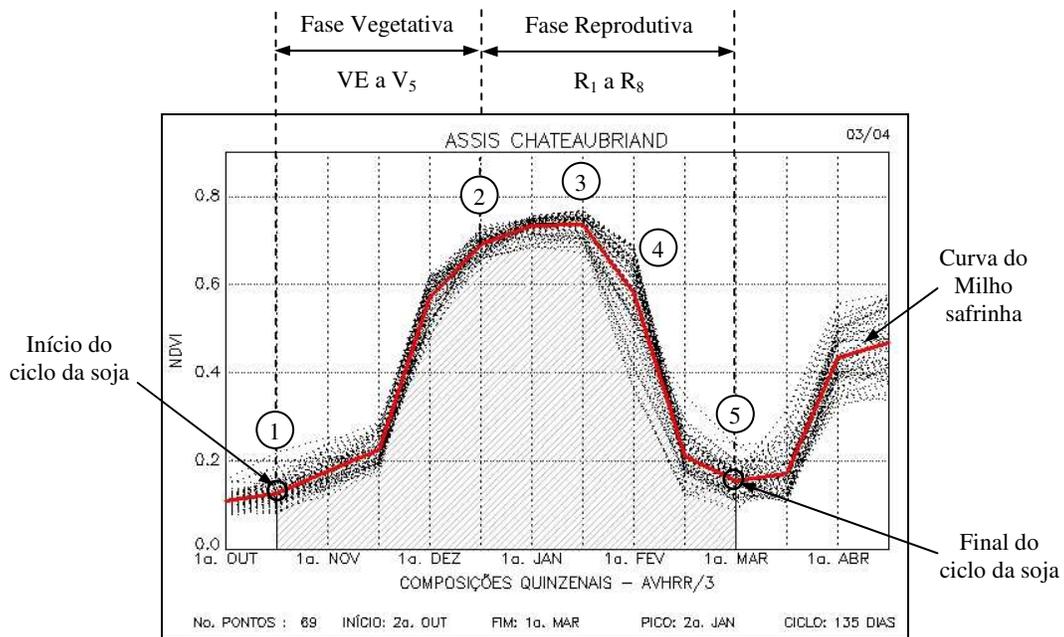


Figura 30. Saída gráfica do perfil temporal do NDVI no município de Assis Chateaubriand, na safra 03/04 (alterada com informações sobre a fenologia da soja).

O mascaramento de nuvens executado no processamento das imagens se mostrou uma atividade importante para evitar a inclusão de pixels contaminados na análise, confirmando os relatos de HOCHHEIM e BARBER (1998) e CHEN et al. (2003). Assim, os pixels contaminados foram substituídos pela média das composições adjacentes, gerando perfis mais homogêneos e com menos imperfeições.

Em alguns casos, foram constatadas variações incoerentes no comportamento do perfil temporal do NDVI, cujas causas claramente não estavam relacionadas à cultura. É o caso do município de Janiópolis durante a safra 2004/2005, onde foi observada uma queda acentuada do NDVI no mês de janeiro, época onde o NDVI deveria alcançar seus maiores valores. Tal incoerência pode ter sido causada por problemas de detecção de nuvens no momento do processamento das imagens. O mascaramento de nuvens tende a funcionar bem quando considerado um pixel plenamente coberto com nuvens. Porém, pode haver problemas de

classificação do pixel quando este está parcialmente coberto por nuvens. Outra possível causa é a inclusão de pixels com ângulos de varredura elevados (próximos ao valor de corte de 42°) nas composições máximas, principalmente nos períodos de maior chuva e, conseqüentemente, menor disponibilidade de imagens livre de nuvens. Em tais pixels, o valor do NDVI é menor quando comparado à medição ao nadir devido ao ângulo de visada elevado e os efeitos da curvatura da Terra. Para amenizar estes problemas, foi incluído no sistema uma rotina para detecção e correção dessas variações incoerentes, substituindo tais valores pela média das composições adjacentes. A Figura 31 apresenta, como exemplo, os resultados da correção das variações do perfil temporal do município de Janiópolis, na safra 2004/2005.

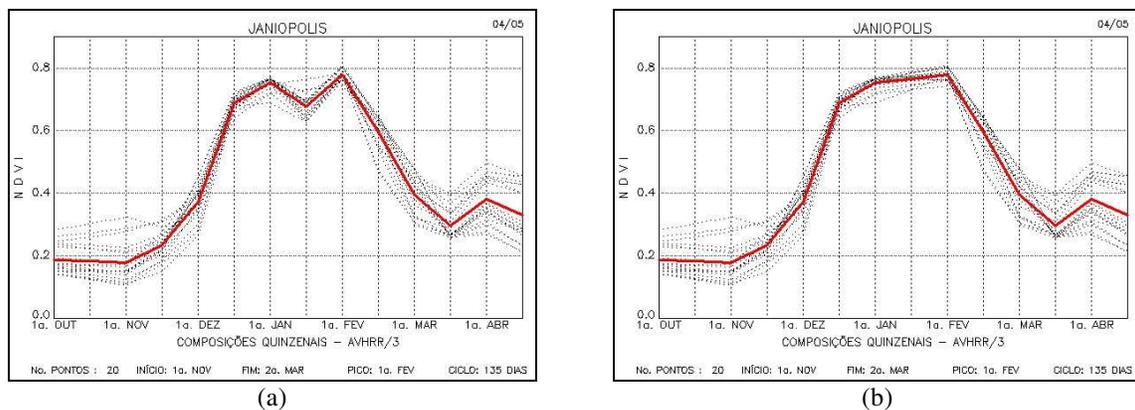


Figura 31. Perfis temporais antes (a) e após (b) a correção das variações incoerentes do NDVI no município de Janiópolis na safra 2004/2005.

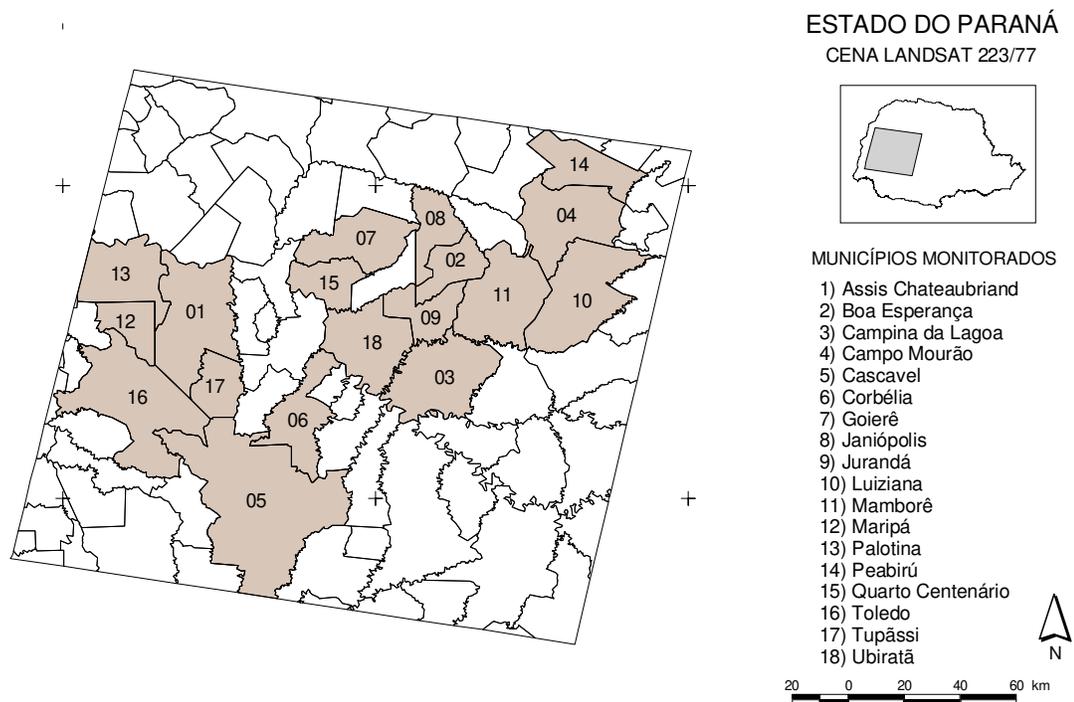
As planilhas geradas pelo sistema também facilitaram a tabulação dos dados para sua análise. Os parâmetros quantitativos extraídos do perfil, assim como as porções consideradas em cada perfil, podem ser ajustados pelo usuário, conforme necessidade. As composições de entrada podem ser tanto decendiais como quinzenais e o sistema é, também, compatível com imagens dos sensores MODIS e SPOT/Vegetation.

4.3. Monitoramento da cultura da soja e as análises da correlação entre NDVI x produtividade nas três safras

O sistema para geração automática dos perfis de NDVI foi alimentado com os limites geográficos dos 70 municípios presentes na cena Landsat 223/77. Entretanto, em apenas 29

municípios o sistema encontrou pixels aptos à geração dos perfis. Isso indica que, dos 70 municípios introduzidos no sistema, apenas 29 apresentaram áreas de soja com tamanho significativo para a análise espectral ao nível NOAA. Os demais municípios ou não continham áreas de soja, ou apresentaram áreas muito pequenas, incompatíveis com a análise espectral ao nível NOAA.

Entre esses 29 municípios, muitos continham um número reduzido de pixels NOAA para a análise da soja. Nesses casos, o perfil médio representou um número reduzido de áreas de soja, não apontando de fato o comportamento do NDVI da cultura sobre todo o município. Assim, para garantir maior representatividade dos perfis médios, foram excluídos os municípios com menos de 10 perfis individuais (ou 10 pixels de soja). Dessa forma, a análise ficou restrita a 18 municípios, mostrados na Figura 32, que se adequaram a esse requisito.



obtidos a partir do monitoramento multi-temporal do NDVI da cultura da soja, nas três safras, coletados nos 18 municípios que se adequaram à análise ai nível NOAA.

Tabela 9. Produtividade média da soja nos municípios monitorados, durante as safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005.

| Municípios | Produtividade média (kg/ha) | | |
|---------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
| | 2002/2003 | 2003/2004 | 2004/2005 |
| Assis Chateaubriand | 3.000 | 2.200 | 2.600 |
| Boa Esperança | 2.950 | 2.700 | 2.355 |
| Campina da Lagoa | 3.100 | 2.975 | 2.870 |
| Campo Mourão | 3.160 | 2.750 | 2.180 |
| Cascavel | 3.300 | 2.750 | 2.355 |
| Corbélia | 3.350 | 3.100 | 3.100 |
| Goioerê | 3.025 | 2.520 | 1.934 |
| Janiópolis | 2.935 | 2.600 | 2.355 |
| Jurandá | 3.099 | 2.727 | 2.600 |
| Luiziana | 3.223 | 3.100 | 2.692 |
| Mamborê | 3.100 | 2.900 | 2.480 |
| Maripá | 2.880 | 2.100 | 2.826 |
| Palotina | 3.000 | 2.200 | 3.100 |
| Peabirú | 3.120 | 3.300 | 2.184 |
| Quarto Centenário | 3.173 | 2.355 | 1.950 |
| Toledo | 3.470 | 2.400 | 2.720 |
| Tupãssi | 3.200 | 2.400 | 2.700 |
| Ubiratã | 3.100 | 2.800 | 2.727 |
| Média | 3.121 | 2.660 | 2.540 |

Fonte: SEAB/DERAL.

4.3.1. Safra 2002/2003

A Figura 33 exibe as 14 composições máximas quinzenais de NDVI, geradas entre os meses de outubro de 2002 e abril de 2003. As áreas escuras da imagem representam pixels contaminados por nuvens, cuja classificação foi realizada no momento do processamento das imagens individuais. Isso indica que, mesmo considerando um período de 15 dias, houve a inclusão de nuvens em algumas composições, principalmente no caso das quinzenas: 2ª de outubro, 2ª de novembro, 1ª de dezembro, 2ª de janeiro e 2ª de março.

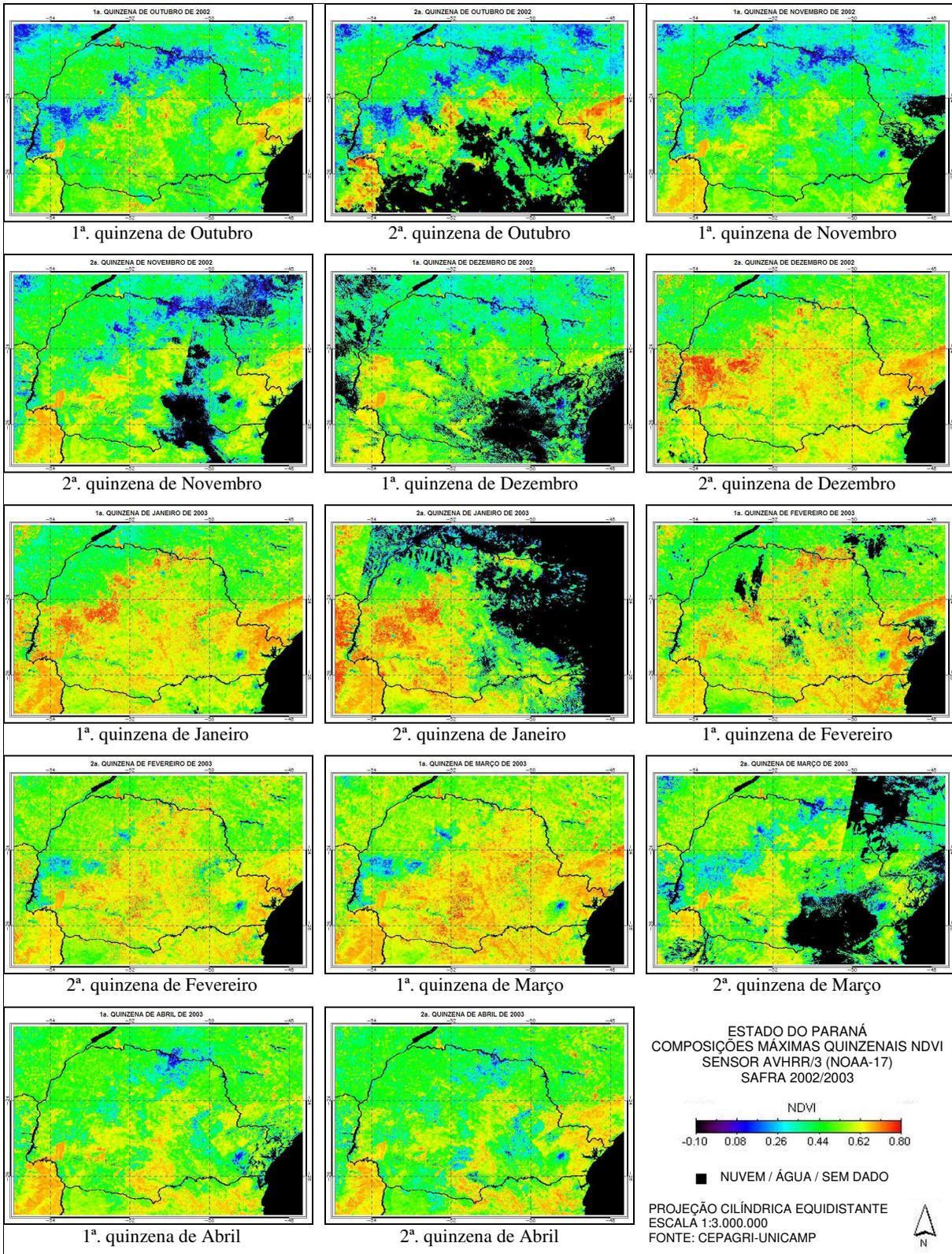


Figura 33. Composições máximas quinzenais de NDVI geradas pelo sensor AVHRR/3 na safra 2002/2003.

Caso as nuvens não tivessem sido previamente classificadas e eliminadas, os pixels contaminados poderiam ter sido introduzidos na análise, causando variações indevidas no formato dos perfis temporais de NDVI. Portanto, o mascaramento de nuvens antes do processo de formação das composições máximas se mostrou uma atividade importante e necessária neste tipo de análise multi-temporal.

Ainda na Figura 33, a seqüência de composições ilustra o desenvolvimento da cultura da soja na chamada “diagonal da soja”, que se estende do sudoeste ao norte do Estado. As áreas azuladas nas primeiras composições (principalmente em outubro) mostram o solo descoberto ou cultura em início de desenvolvimento, com valores de NDVI baixos. Com o desenvolvimento da cultura e o crescimento vegetativo, a quantidade de biomassa aumenta, os valores do NDVI sobem e as áreas, antes em azul, tornam-se avermelhadas (2ª quinzena de dezembro e no mês de janeiro). Mais tarde, a coloração passa do vermelho ao verde, mostrando a queda do NDVI durante a maturação e senescência da cultura, voltando à coloração azul no momento da colheita (2ª quinzena de março, principalmente).

As Figuras 34 e 35 mostram as saídas gráficas dos perfis temporais dos 18 municípios monitorados. Foram constatadas algumas dificuldades na definição do início e final do ciclo produtivo, uma vez que a detecção automática não funcionou em alguns casos. As composições máximas quinzenais possibilitaram a aquisição de perfis temporais com menores interferências causadas por nuvens. Por outro lado, ao utilizar um período de 15 dias, constatou-se maiores dificuldades para a definição do início e final do ciclo. Em alguns casos, foram utilizadas composições decendiais para determinar, com maior precisão, essas datas.

Verificou-se em algumas oportunidades que o comportamento do perfil médio foi afetado em municípios onde houve diferenças nas datas de plantio ou uso de cultivares com distintas durações. No município de Assis Chateaubriand, por exemplo, todos os perfis individuais tiveram um comportamento semelhante ao longo de quase todo o ciclo produtivo. Entretanto, ao final do ciclo, percebeu-se que parte deles terminou na 1ª quinzena de março e outra parte na 2ª quinzena do mesmo mês. Comportamento semelhante ocorreu em Boa Esperança, Campina da Lagoa, Peabirú e Tupãssi. Com relação ao número de perfis individuais, os municípios de Assis Chateaubriand, Toledo, Ubiratã, Mamborê e Jurandá foram aqueles com maior número encontrado.

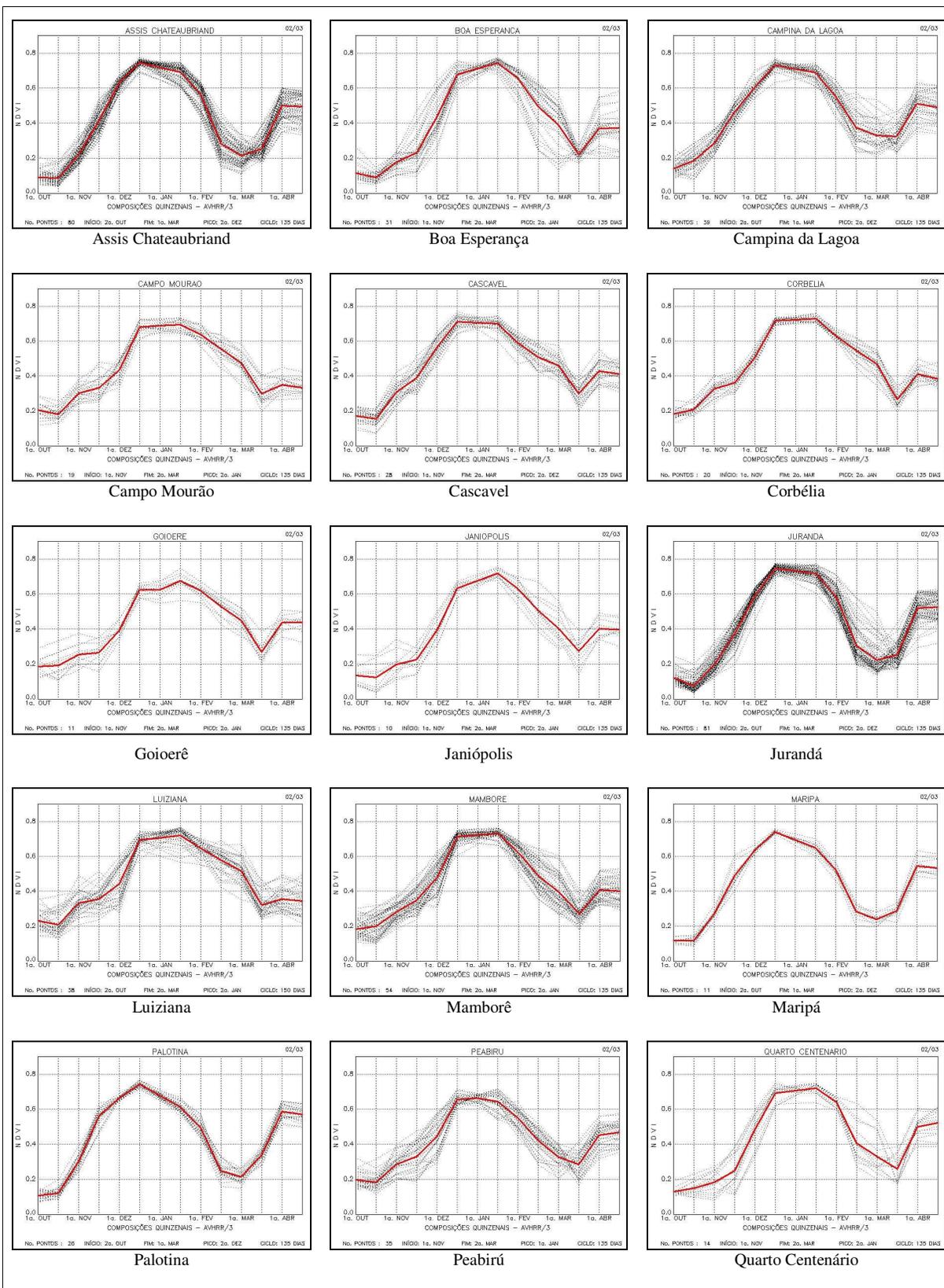


Figura 34. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2002/2003 nos municípios de Assis Chateaubriand à Quarto Centenário.

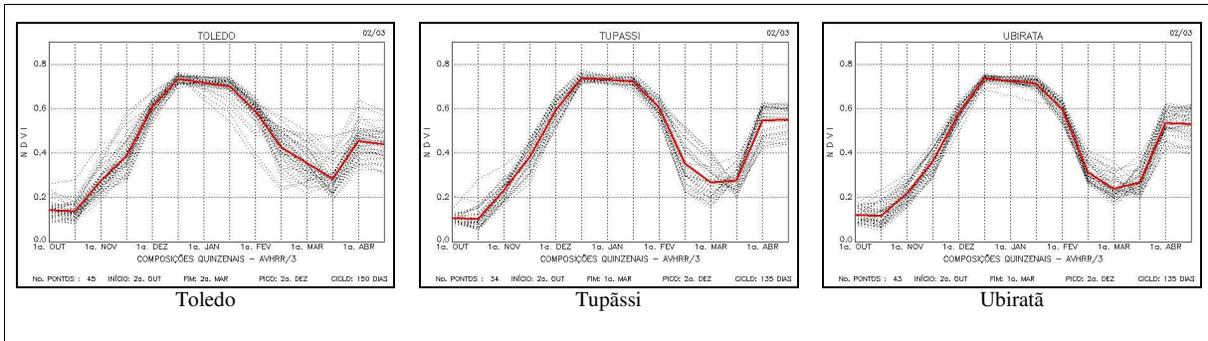


Figura 35. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2002/2003 nos municípios de Toledo à Ubiratã.

A duração média dos ciclos foi de 135 dias, ou 9 quinzenas, tendo chegado a 10 quinzenas em alguns casos. Não foram constatados ciclos de 8 quinzenas (ou 120 dias).

A Figura 36 ilustra os perfis médios dos 18 municípios em um único gráfico. Verificou-se que, na maioria dos casos, o início do ciclo se deu na segunda quinzena de outubro e na primeira quinzena de novembro. O fim do ciclo ocorreu entre a primeira e a segunda quinzenas de março.

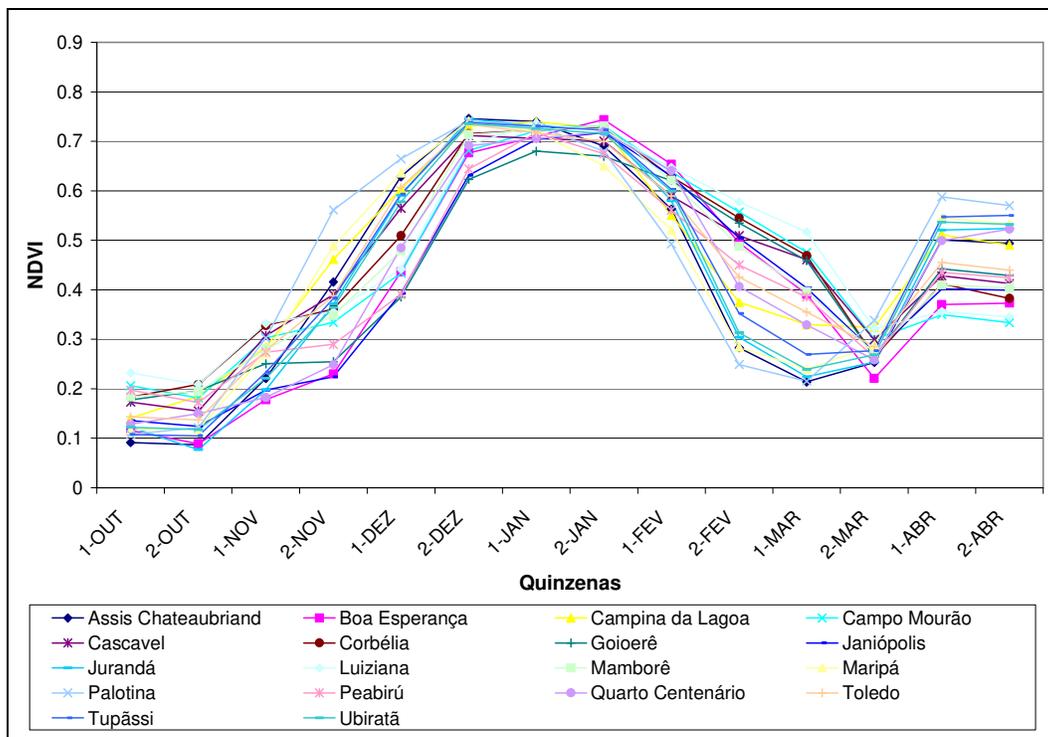


Figura 36. Perfis temporais médios do NDVI nos 18 municípios analisados na safra 2002/2003.

Os perfis desta safra foram prejudicados por quedas do valor do NDVI na primeira quinzena de janeiro, devido à contaminação por nuvens não detectadas pelos classificadores ou por problemas de ângulos de visada excessivos, como já discutido. Na maioria dos casos, esta composição teve seus valores substituídos pela média das composições adjacentes. Os valores máximos de NDVI observados nesta safra foram, em média, 0,74 e ocorreram, em sua maioria, na 2ª quinzena de dezembro, muito provavelmente devido aos problemas encontrados na composição da 1ª quinzena de janeiro.

A Tabela 10 contém os parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI nos 18 municípios nos períodos 1, 2 e 3. A Tabela 11 mostra os parâmetros extraídos nos períodos 4, 5 e 6. No período 1 foram mensurados os parâmetros área integrada, somatório, valor médio, valor máximo e amplitude. Nos demais períodos, somente os parâmetros área integrada, somatório e valor médio foram mensurados.

A Tabela 12 mostra as correlações obtidas entre cada um dos parâmetros e a produtividade média municipal. Verificou-se que as correlações mais significativas na safra 2002/2003 ocorreram no período 1, ou seja, quando foi considerado do início ao fim do ciclo, alcançando o coeficiente de correlação máximo de 0,78 ($R^2=0,61$). Em todos os períodos, os parâmetros área integrada e somatório foram os que apresentaram as maiores correlações com a produtividade. Já os parâmetros valor máximo e amplitude, calculados somente no período 1, apresentaram correlações não significativas.

Houve uma tendência de queda das correlações quando partes menores do perfil foram consideradas. Esta queda não pareceu ser acentuada até o período 3 (início até 1 mês antes do fim do ciclo), onde os coeficientes de correlação caíram para 0,74 no caso da área integrada e somatório. A partir do período 4 (início até 45 dias antes do fim do ciclo), as correlações apresentaram uma queda mais acentuada, alcançando coeficientes de correlação de 0,68 e 0,70 para área integrada e somatório, respectivamente. Do período 1 ao período 4, verificou-se que o parâmetro somatório foi o que apresentou maior estabilidade, passando de 0,75 para 0,70, respectivamente. Já o parâmetro área integrada, no mesmo intervalo, passou de 0,78 a 0,68. O período 6, que considerou somente as composições com valor de NDVI superior a 0,30, não apresentou boas correlações, alcançando $R=0,64$ para os parâmetros área integrada e somatório e mostrou correlação não significativa para o parâmetro valor médio.

Tabela 10. Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2002/2003, nos períodos 1, 2 e 3.

| Municípios | Período 1 | | | | | Período 2 | | | Período 3 | | |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>V_max</i> | <i>Amp</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> |
| Assis Chateaubriand | 4,4482 | 4,5882 | 0,4588 | 0,7459 | 0,6589 | 4,2312 | 4,3747 | 0,4861 | 3,7930 | 4,0919 | 0,5115 |
| Boa Esperança | 4,5914 | 4,7733 | 0,4773 | 0,7498 | 0,5722 | 4,2751 | 4,5524 | 0,5058 | 3,8417 | 4,1622 | 0,5203 |
| Campina da Lagoa | 4,6789 | 4,9291 | 0,4929 | 0,7305 | 0,5456 | 4,3138 | 4,5997 | 0,5111 | 3,8786 | 4,2251 | 0,5281 |
| Campo Mourão | 4,8638 | 5,1462 | 0,5146 | 0,7307 | 0,4306 | 4,4901 | 4,8462 | 0,5385 | 3,9614 | 4,3709 | 0,5464 |
| Cascavel | 4,9794 | 5,2661 | 0,5266 | 0,7344 | 0,4295 | 4,6004 | 4,9612 | 0,5512 | 4,1087 | 4,5101 | 0,5638 |
| Corbélia | 5,2461 | 5,4287 | 0,5124 | 0,7395 | 0,5291 | 4,8817 | 5,1871 | 0,5537 | 4,3705 | 4,7476 | 0,5495 |
| Goierê | 4,4888 | 4,7285 | 0,4729 | 0,6696 | 0,4191 | 4,1332 | 4,4646 | 0,4961 | 3,6241 | 4,0058 | 0,5007 |
| Janiópolis | 4,4566 | 4,6801 | 0,4680 | 0,7170 | 0,5199 | 4,1263 | 4,4072 | 0,4897 | 3,6631 | 4,0034 | 0,5004 |
| Jurandá | 4,4285 | 4,5682 | 0,4568 | 0,7621 | 0,6851 | 4,1924 | 4,3442 | 0,4827 | 3,7391 | 4,0402 | 0,5050 |
| Luiziana | 4,8966 | 5,2421 | 0,5242 | 0,7490 | 0,5400 | 4,3353 | 4,7252 | 0,5250 | 3,7440 | 4,1477 | 0,5185 |
| Mamborê | 4,8243 | 5,0842 | 0,5084 | 0,7550 | 0,4827 | 4,5100 | 4,8119 | 0,5347 | 4,0529 | 4,4156 | 0,5519 |
| Maripá | 4,4518 | 4,6164 | 0,4616 | 0,7341 | 0,6097 | 4,1716 | 4,3875 | 0,4875 | 3,7880 | 4,0827 | 0,5103 |
| Palotina | 4,4859 | 4,6440 | 0,4644 | 0,7412 | 0,6203 | 4,2521 | 4,4289 | 0,4921 | 3,8913 | 4,1800 | 0,5225 |
| Peabirú | 4,6236 | 4,8140 | 0,4376 | 0,7334 | 0,5597 | 4,3047 | 4,5549 | 0,4555 | 3,9270 | 4,2021 | 0,4669 |
| Quarto Centenário | 4,3948 | 4,6023 | 0,4602 | 0,7213 | 0,5427 | 4,0714 | 4,3489 | 0,4832 | 3,7621 | 4,0264 | 0,5033 |
| Toledo | 5,0536 | 5,2348 | 0,5284 | 0,7383 | 0,6013 | 4,7206 | 4,9497 | 0,5375 | 4,3569 | 4,5951 | 0,5675 |
| Tupãssi | 4,5845 | 4,7583 | 0,4758 | 0,7593 | 0,6544 | 4,3039 | 4,4892 | 0,4988 | 3,8120 | 4,1370 | 0,5171 |
| Ubiratã | 4,4682 | 4,6376 | 0,4638 | 0,7565 | 0,6394 | 4,2296 | 4,3985 | 0,4887 | 3,7527 | 4,0854 | 0,5107 |
| <i>Média</i> | 4,6647 | 4,8746 | 0,4836 | 0,7371 | 0,5578 | 4,3413 | 4,6018 | 0,5066 | 3,8926 | 4,2238 | 0,5219 |
| <i>Variância</i> | 0,0639 | 0,0799 | 0,0008 | 0,0004 | 0,0066 | 0,0475 | 0,0638 | 0,0008 | 0,0447 | 0,0469 | 0,0007 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,2528 | 0,2827 | 0,0284 | 0,0211 | 0,0810 | 0,2179 | 0,2526 | 0,0275 | 0,2114 | 0,2166 | 0,0256 |

Ai = área integrada sob o perfil no período.

Soma = somatório no período.

V_med = valor médio no período.

V_max = valor máximo no período.

Amp = amplitude no período (valor máximo – valor mínimo).

Período 1: início ao fim do ciclo.

Período 2: início até uma quinzena antes do fim do ciclo.

Período 3: início até duas quinzenas antes do fim do ciclo.

Tabela 11. Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2002/2003, nos períodos 4, 5 e 6.

| Municípios | Período 4 | | | Período 5 | | | Período 6 | | |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> |
| Assis Chateaubriand | 3,1550 | 3,5289 | 0,5041 | 2,4370 | 2,8387 | 0,4731 | 3,3258 | 3,7843 | 0,6307 |
| Boa Esperança | 3,2618 | 3,6670 | 0,5239 | 2,5565 | 3,0131 | 0,5022 | 3,7626 | 4,1450 | 0,5921 |
| Campina da Lagoa | 3,2468 | 3,6745 | 0,5249 | 2,5422 | 2,9863 | 0,4977 | 4,0679 | 4,4604 | 0,5576 |
| Campo Mourão | 3,3504 | 3,8140 | 0,5449 | 2,6834 | 3,1754 | 0,5292 | 4,8638 | 5,1462 | 0,5146 |
| Cascavel | 3,5779 | 4,0045 | 0,5721 | 2,9359 | 3,4262 | 0,5710 | 4,9794 | 5,2661 | 0,5266 |
| Corbélia | 3,8270 | 4,2123 | 0,5474 | 3,1299 | 3,5886 | 0,5484 | 4,6427 | 4,9767 | 0,5530 |
| Goierê | 3,0397 | 3,4713 | 0,4959 | 2,3902 | 2,8510 | 0,4752 | 3,5675 | 3,9597 | 0,5657 |
| Janiópolis | 3,0944 | 3,4988 | 0,4998 | 2,4122 | 2,8690 | 0,4782 | 3,6190 | 3,9860 | 0,5694 |
| Jurandá | 3,0772 | 3,4602 | 0,4943 | 2,3341 | 2,7438 | 0,4573 | 3,7764 | 4,0693 | 0,5813 |
| Luiziana | 3,0511 | 3,5008 | 0,5001 | 2,3104 | 2,7798 | 0,4633 | 4,6483 | 5,0331 | 0,5592 |
| Mamborê | 3,4931 | 3,9278 | 0,5611 | 2,8088 | 3,3066 | 0,5511 | 4,1615 | 4,5314 | 0,5664 |
| Maripá | 3,1887 | 3,5662 | 0,5095 | 2,5256 | 2,9142 | 0,4857 | 3,6438 | 4,0032 | 0,5719 |
| Palotina | 3,3389 | 3,6874 | 0,5268 | 2,6927 | 3,0751 | 0,5125 | 3,6979 | 4,0591 | 0,5799 |
| Peabirú | 3,4656 | 3,7953 | 0,4744 | 2,8597 | 3,2608 | 0,4658 | 4,3846 | 4,6404 | 0,4640 |
| Quarto Centenário | 3,2348 | 3,6284 | 0,5183 | 2,5645 | 3,0009 | 0,5001 | 3,5502 | 3,9269 | 0,5610 |
| Toledo | 3,8419 | 4,1699 | 0,5464 | 3,1792 | 3,5808 | 0,5464 | 4,1815 | 4,5351 | 0,5365 |
| Tupãssi | 3,1345 | 3,5340 | 0,5049 | 2,3894 | 2,8110 | 0,4685 | 3,8255 | 4,1510 | 0,5930 |
| Ubiratã | 3,0828 | 3,4867 | 0,4981 | 2,3428 | 2,7714 | 0,4619 | 3,7675 | 4,0607 | 0,5801 |
| <i>Média</i> | 3,3034 | 3,7016 | 0,5193 | 2,6164 | 3,0552 | 0,4993 | 4,0259 | 4,3741 | 0,5613 |
| <i>Variância</i> | 0,0621 | 0,0569 | 0,0007 | 0,0726 | 0,0755 | 0,0013 | 0,2433 | 0,2187 | 0,0013 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,2492 | 0,2385 | 0,0263 | 0,2694 | 0,2749 | 0,0359 | 0,4933 | 0,4677 | 0,0357 |

Ai = área integrada sob o perfil no período.

Soma = somatório no período.

V_med = valor médio no período.

Período 4: início até três quinzenas antes do fim do ciclo.

Período 5: início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo.

Período 6: período do ciclo com NDVI superior a 0,30.

Tabela 12. Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja na safra 2002/2003.

| Período | Parâmetro | R | R² | P-Valor |
|--|------------------|----------|----------------------|----------------|
| Período 1 Início ao fim do ciclo | Área integrada | 0,78 | 0,61 | 0,000 |
| | Somatório | 0,75 | 0,56 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,68 | 0,46 | 0,002 |
| | Valor máximo | 0,15 | 0,02 | 0,540 NS |
| | Amplitude | -0,15 | 0,02 | 0,551 NS |
| Período 2 Início até uma quinzena antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,77 | 0,59 | 0,000 |
| | Somatório | 0,74 | 0,55 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,63 | 0,39 | 0,005 |
| Período 3 Início até duas quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,74 | 0,55 | 0,000 |
| | Somatório | 0,74 | 0,55 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,60 | 0,35 | 0,009 |
| Período 4 Início até três quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,68 | 0,46 | 0,002 |
| | Somatório | 0,70 | 0,49 | 0,001 |
| | Valor médio | 0,47 | 0,22 | 0,050 |
| Período 5 Início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,63 | 0,39 | 0,005 |
| | Somatório | 0,64 | 0,41 | 0,004 |
| | Valor médio | 0,51 | 0,26 | 0,032 |
| Período 6 Período do ciclo com NDVI superior a 0,30 | Área integrada | 0,64 | 0,41 | 0,004 |
| | Somatório | 0,64 | 0,41 | 0,004 |
| | Valor médio | 0,41 | 0,17 | 0,092 NS |

NS – Correlações não significativas ao nível de 95% (P-Valor > 0,05).

A Figura 37 mostra o gráfico das correlações mais significativas obtidas nos seis períodos analisados. Constatou-se que mais de 61% da variabilidade da produtividade da soja puderam ser explicados pelo monitoramento do perfil temporal ao longo de todo o ciclo produtivo. Considerando um mês antes do término da safra, o monitoramento do perfil temporal do NDVI pôde explicar 54% da variabilidade da produtividade da soja na região estudada. Dois meses antes do fim do ciclo, somente 41% da produtividade puderam ser explicados pelos perfis do NDVI.

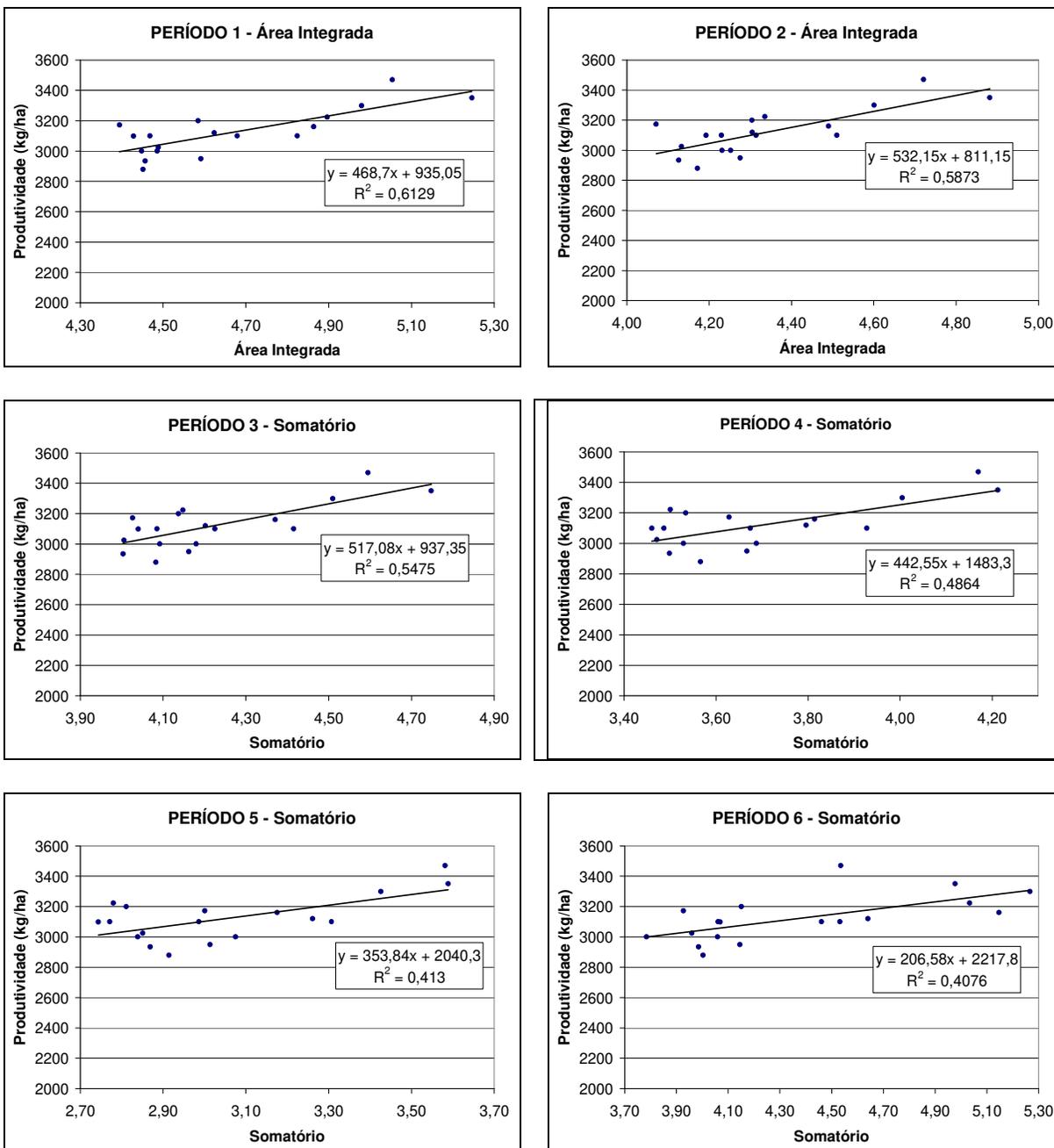


Figura 37. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2002/2003, em cada um dos seis períodos analisados.

4.3.2. Safra 2003/2004

A Figura 38 mostra as composições máximas quinzenais elaboradas entre os meses de outubro de 2003 e abril de 2004.

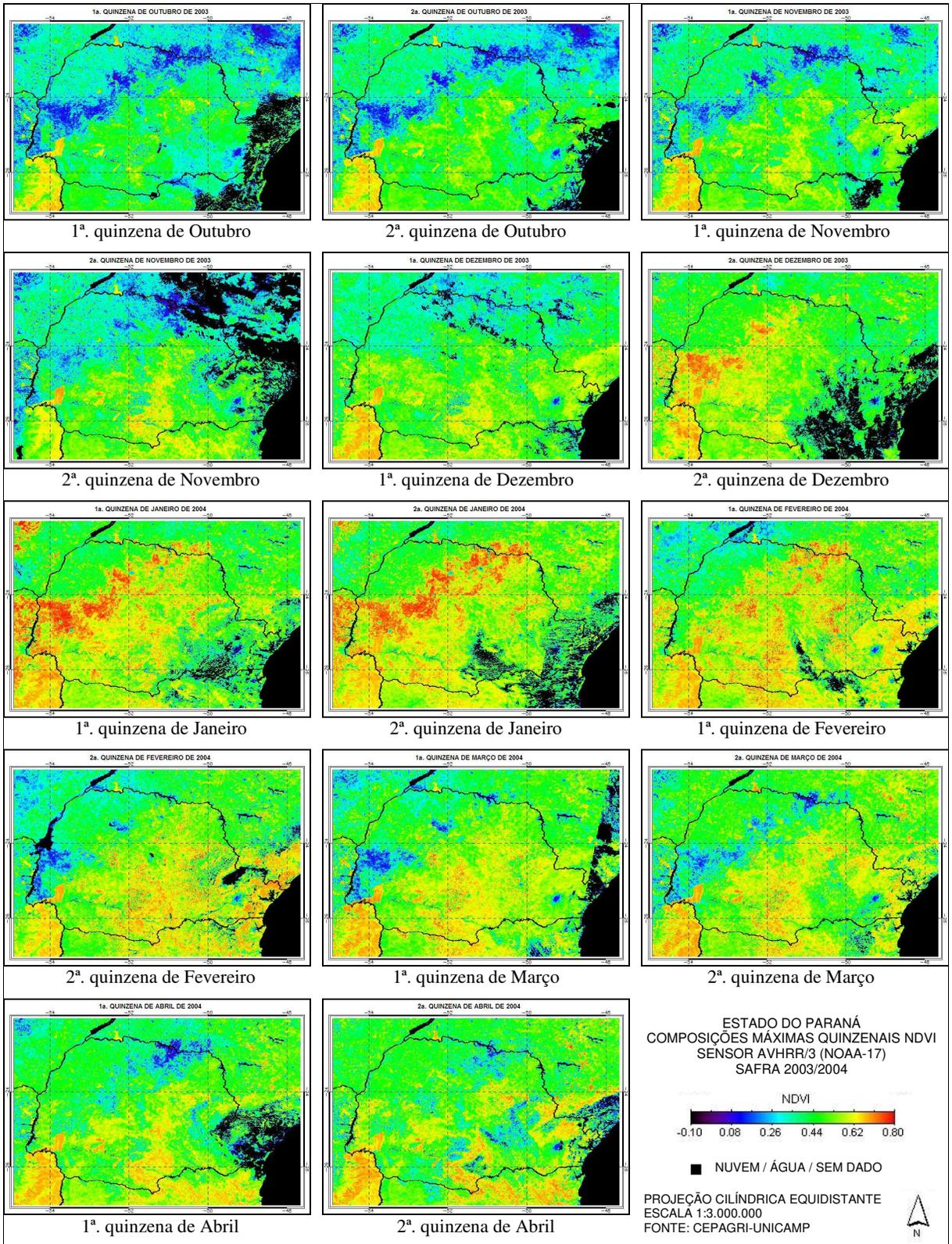


Figura 38. Composições máximas quinzenais de NDVI geradas pelo sensor AVHRR/3 na safra 2003/2004.

A Figura 38 ilustra, novamente, a presença de nuvens nas composições, onde o período de 15 dias não foi suficiente para eliminá-las por completo.

As Figuras 39 e 40 e mostram as saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI nos 18 municípios monitorados. Novamente, porém em menor intensidade, foram constatados alguns casos onde o perfil médio foi influenciado por datas de semeadura diferentes e distintas durações do ciclo produtivo em um mesmo município, como nota-se nos casos de Campina da Lagoa, Cascavel e Jurandá. O ciclo médio nessa safra foi de aproximadamente 135 dias, sendo poucos os municípios que apresentaram ciclos superiores a 9 quinzenas. Embora tenha sido notada a presença de nuvens nas composições máximas, não houve casos onde a contaminação por nuvens tenha afetado o comportamento dos perfis temporais. Os municípios com maior número de perfis temporais individuais foram Assis Chateaubriand e Toledo, com mais de 60 pixels cada um. Corbéia, Goioerê e Peabirú foram os municípios com menor número de perfis individuais (10 cada um).

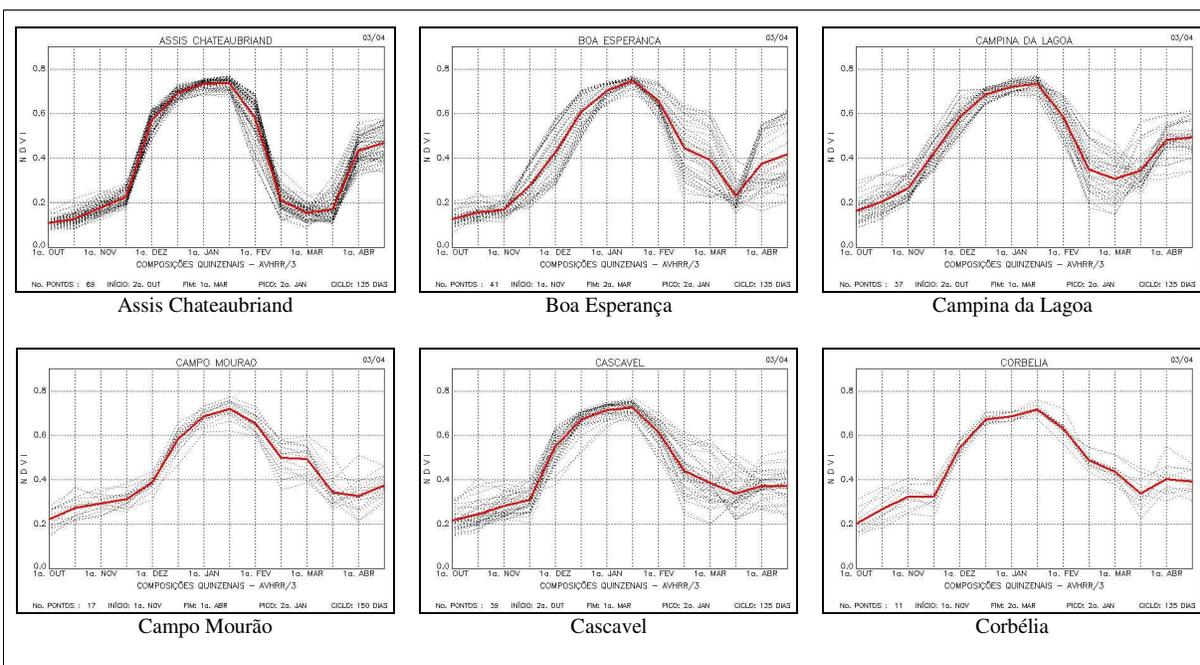


Figura 39. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2003/2004 nos municípios de Assis Chateaubriand à Corbéia.

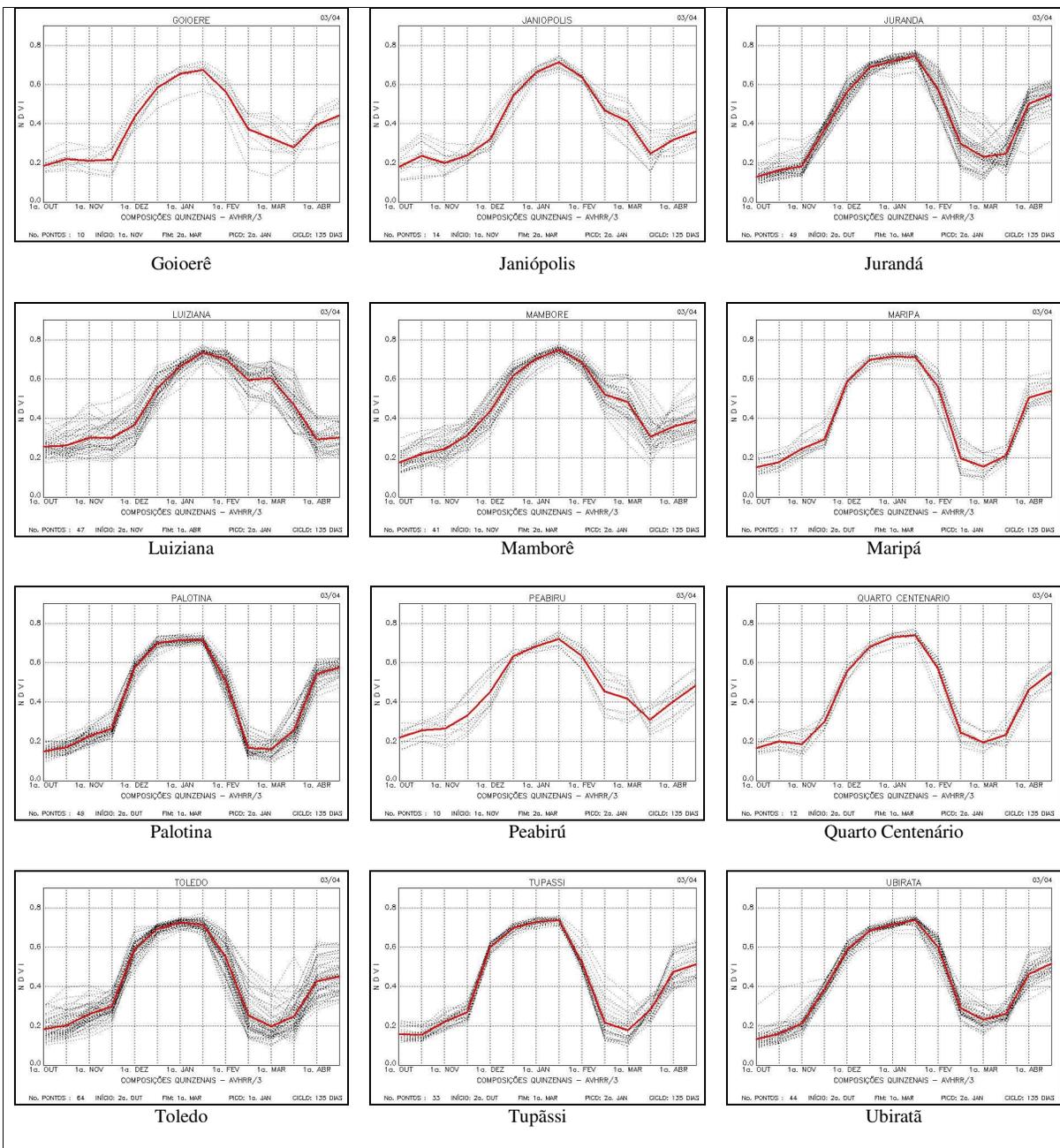


Figura 40. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2003/2004 nos municípios de Goioerê à Ubatã.

A Figura 41 mostra os perfis médios dos 18 municípios agrupados em um mesmo gráfico, onde verificou-se que o início do ciclo se deu entre a 2ª quinzena de outubro e 1ª quinzena de novembro e o término entre a 1ª e a 2ª quinzenas de março. Os valores máximos no ciclo mostram uma média de 0,74 e ocorreram nas composições do mês de janeiro.

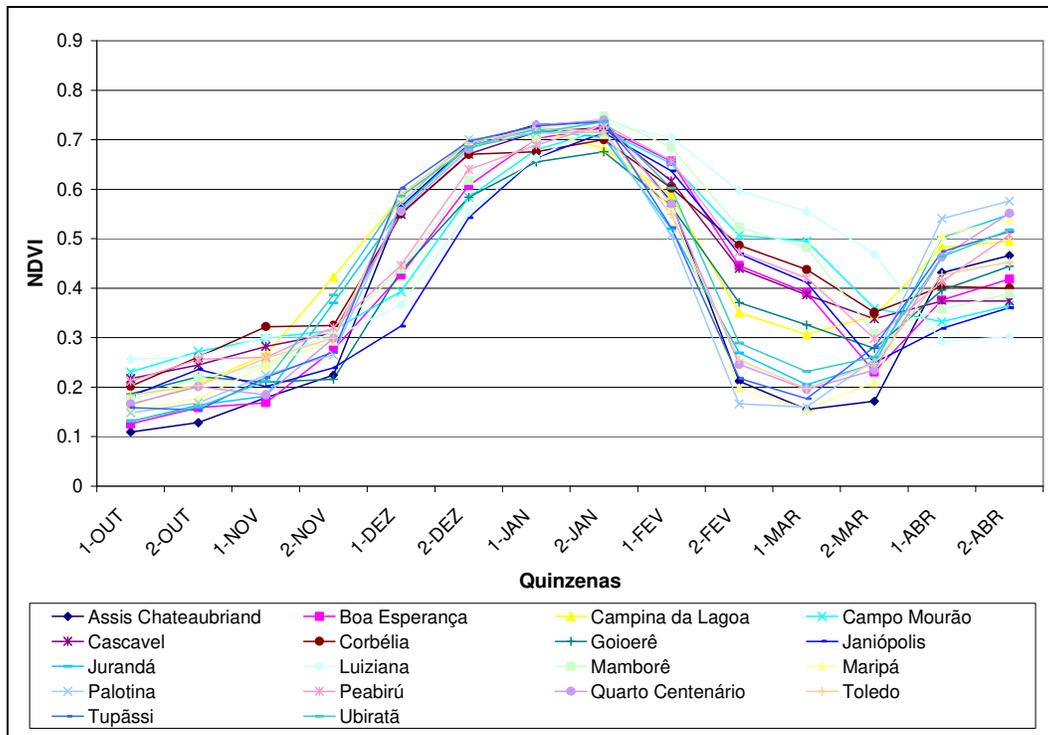


Figura 41. Perfis temporais médios do NDVI nos 18 municípios analisados na safra 2003/2004.

A Tabela 13 mostra os parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI nos períodos 1, 2 e 3 e a Tabela 14 mostra os parâmetros extraídos nos períodos 3, 4 e 5. Por essas Tabelas, verifica-se que os parâmetros área integrada e somatório apresentam valores próximos, porém o somatório é sempre maior, pois não considera a aproximação trapezoidal levado em conta no cálculo da área integrada. Outra característica notada é a variação do valor médio, que aumenta conforme são considerados períodos menores do ciclo, pois deixa de considerar os valores baixos de NDVI encontrados no final da safra.

A Tabela 15 apresenta as correlações obtidas entre cada um dos parâmetros e a produtividade média municipal na safra 2003/2004.

Tabela 13. Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2003/2004, nos períodos 1, 2 e 3.

| Municípios | Período 1 | | | | | Período 2 | | | Período 3 | | |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>V_max</i> | <i>Amp</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> |
| Assis Chateaubriand | 4,0694 | 4,2080 | 0,4292 | 0,7370 | 0,6092 | 3,9791 | 4,0526 | 0,4593 | 3,5340 | 3,8414 | 0,4802 |
| Boa Esperança | 4,4678 | 4,6400 | 0,4547 | 0,7498 | 0,5844 | 4,1353 | 4,4104 | 0,4802 | 3,7541 | 4,0255 | 0,5032 |
| Campina da Lagoa | 4,5877 | 4,8324 | 0,4736 | 0,7368 | 0,5383 | 4,2690 | 4,5361 | 0,4939 | 3,8209 | 4,1906 | 0,5238 |
| Campo Mourão | 4,9872 | 5,3030 | 0,4917 | 0,7203 | 0,4271 | 4,6760 | 4,9765 | 0,5076 | 4,2397 | 4,6332 | 0,5148 |
| Cascavel | 4,6300 | 4,9394 | 0,4841 | 0,7246 | 0,4797 | 4,2590 | 4,5531 | 0,4958 | 3,7157 | 4,1134 | 0,5142 |
| Corbélia | 4,8011 | 5,1564 | 0,5260 | 0,7238 | 0,3817 | 4,3965 | 4,7984 | 0,5438 | 4,0154 | 4,4091 | 0,5511 |
| Goierê | 4,1910 | 4,4442 | 0,4533 | 0,6672 | 0,4431 | 3,9873 | 4,1477 | 0,4701 | 3,4741 | 3,7761 | 0,4720 |
| Janiópolis | 4,2128 | 4,4215 | 0,4333 | 0,7142 | 0,5092 | 3,8673 | 4,1709 | 0,4542 | 3,4134 | 3,7422 | 0,4678 |
| Jurandá | 4,3379 | 4,5372 | 0,4628 | 0,7455 | 0,5817 | 4,0669 | 4,3055 | 0,4880 | 3,6563 | 4,0061 | 0,5008 |
| Luiziana | 5,2995 | 5,5847 | 0,4975 | 0,7333 | 0,4410 | 4,9223 | 5,2924 | 0,5187 | 4,3720 | 4,8241 | 0,5360 |
| Mamborê | 4,8071 | 5,0616 | 0,5163 | 0,7471 | 0,5007 | 4,3906 | 4,7532 | 0,5387 | 3,9081 | 4,2712 | 0,5339 |
| Maripá | 4,2010 | 4,3645 | 0,4277 | 0,7169 | 0,5621 | 4,0123 | 4,2097 | 0,4584 | 3,6916 | 4,0171 | 0,5021 |
| Palotina | 4,0147 | 4,1786 | 0,4262 | 0,7159 | 0,5565 | 3,9225 | 4,0193 | 0,4555 | 3,5756 | 3,8582 | 0,4823 |
| Peabirú | 4,8573 | 5,1120 | 0,5112 | 0,7671 | 0,5103 | 4,4145 | 4,8113 | 0,5346 | 3,9693 | 4,3119 | 0,5390 |
| Quarto Centenário | 3,9798 | 4,2290 | 0,4793 | 0,7391 | 0,5585 | 3,8245 | 4,0243 | 0,5131 | 3,3986 | 3,7624 | 0,5375 |
| Toledo | 4,2879 | 4,4821 | 0,4392 | 0,7245 | 0,5276 | 4,0234 | 4,2852 | 0,4666 | 3,6994 | 4,0304 | 0,5038 |
| Tupãssi | 4,1429 | 4,2974 | 0,4383 | 0,7345 | 0,5834 | 4,0214 | 4,1298 | 0,4680 | 3,6510 | 3,9252 | 0,4907 |
| Ubiratã | 4,3896 | 4,5785 | 0,4487 | 0,7363 | 0,5823 | 4,1644 | 4,3553 | 0,4742 | 3,7189 | 4,0741 | 0,5093 |
| <i>Média</i> | 4,4592 | 4,6873 | 0,4663 | 0,7297 | 0,5209 | 4,1851 | 4,4351 | 0,4900 | 3,7560 | 4,1007 | 0,5090 |
| <i>Variância</i> | 0,1385 | 0,1749 | 0,0011 | 0,0004 | 0,0042 | 0,0834 | 0,1328 | 0,0009 | 0,0701 | 0,0892 | 0,0006 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,3722 | 0,4182 | 0,0325 | 0,0207 | 0,0646 | 0,2888 | 0,3644 | 0,0299 | 0,2647 | 0,2987 | 0,0245 |

Ai = área integrada sob o perfil no período.

Soma = somatório no período.

V_med = valor médio no período.

V_max = valor máximo no período.

Amp = amplitude no período (valor máximo – valor mínimo).

Período 1: início ao fim do ciclo.

Período 2: início até uma quinzena antes do fim do ciclo.

Período 3: início até duas quinzenas antes do fim do ciclo.

Tabela 14. Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2003/2004, nos períodos 4, 5 e 6.

| Municípios | Período 4 | | | Período 5 | | | Período 6 | | |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> |
| Assis Chateaubriand | 2,8348 | 3,2604 | 0,4751 | 2,0950 | 2,5234 | 0,4290 | 2,7804 | 3,3112 | 0,6622 |
| Boa Esperança | 3,1976 | 3,5884 | 0,5024 | 2,4811 | 2,9329 | 0,4790 | 3,5780 | 3,9673 | 0,5668 |
| Campina da Lagoa | 3,1377 | 3,6034 | 0,5045 | 2,4086 | 2,8666 | 0,4682 | 3,7269 | 4,0756 | 0,5822 |
| Campo Mourão | 3,7638 | 4,1400 | 0,5279 | 3,1746 | 3,6396 | 0,5303 | 4,6910 | 5,0097 | 0,5010 |
| Cascavel | 3,0166 | 3,4967 | 0,4895 | 2,2925 | 2,7721 | 0,4528 | 4,0846 | 4,4124 | 0,5515 |
| Corbélia | 3,5194 | 3,9836 | 0,5805 | 2,8479 | 3,3873 | 0,5043 | 4,8011 | 5,1564 | 0,5156 |
| Goierê | 2,9934 | 3,3840 | 0,4931 | 2,3621 | 2,8093 | 0,4776 | 3,2708 | 3,6704 | 0,5243 |
| Janiópolis | 2,8445 | 3,2542 | 0,4556 | 2,1571 | 2,6194 | 0,4188 | 3,3995 | 3,7432 | 0,5347 |
| Jurandá | 2,9708 | 3,2567 | 0,4998 | 2,2399 | 2,6846 | 0,4564 | 3,2213 | 3,6606 | 0,6101 |
| Luiziana | 3,7836 | 4,2188 | 0,5168 | 3,1236 | 3,6225 | 0,5071 | 4,9223 | 5,2924 | 0,5292 |
| Mamborê | 3,2950 | 3,7485 | 0,5462 | 2,5685 | 3,0637 | 0,5482 | 4,5477 | 4,8153 | 0,5350 |
| Maripá | 3,0128 | 3,4519 | 0,4833 | 2,2944 | 2,7350 | 0,4394 | 3,1932 | 3,5868 | 0,5978 |
| Palotina | 2,9154 | 3,3498 | 0,4881 | 2,1999 | 2,6340 | 0,4478 | 2,7274 | 3,2051 | 0,6410 |
| Peabirú | 3,3695 | 3,8343 | 0,5478 | 2,6286 | 3,1419 | 0,5237 | 3,8098 | 4,2640 | 0,6091 |
| Quarto Centenário | 2,7226 | 3,1760 | 0,5399 | 1,9512 | 2,4369 | 0,4971 | 2,7650 | 3,2988 | 0,6598 |
| Toledo | 3,0305 | 3,4813 | 0,4874 | 2,3054 | 2,7659 | 0,4518 | 2,7427 | 3,2706 | 0,6541 |
| Tupãssi | 2,9765 | 3,4115 | 0,4971 | 2,2431 | 2,6770 | 0,4551 | 2,7744 | 3,2792 | 0,6558 |
| Ubiratã | 3,0291 | 3,4743 | 0,4864 | 2,3038 | 2,7380 | 0,4472 | 3,2548 | 3,7156 | 0,6193 |
| <i>Média</i> | 3,1341 | 3,5619 | 0,5067 | 2,4265 | 2,8917 | 0,4741 | 3,5717 | 3,9853 | 0,5861 |
| <i>Variância</i> | 0,0920 | 0,0948 | 0,0010 | 0,1109 | 0,1230 | 0,0014 | 0,5697 | 0,4780 | 0,0031 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,3034 | 0,3080 | 0,0309 | 0,3330 | 0,3507 | 0,0368 | 0,7548 | 0,6913 | 0,0554 |

Ai = área integrada sob o perfil no período.

Soma = somatório no período.

V_med = valor médio no período.

Período 4: início até três quinzenas antes do fim do ciclo.

Período 5: início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo.

Período 6: período do ciclo com NDVI superior a 0,30.

Tabela 15. Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja na safra 2003/2004.

| Período | Parâmetro | R | R ² | P-Valor |
|--|----------------|-------|----------------|----------|
| Período 1 Início ao fim do ciclo | Área integrada | 0,83 | 0,69 | 0,000 |
| | Somatório | 0,84 | 0,70 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,82 | 0,68 | 0,000 |
| | Valor máximo | 0,40 | 0,16 | 0,102 NS |
| | Amplitude | -0,53 | 0,28 | 0,025 |
| Período 2 Início até uma quinzena antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,73 | 0,54 | 0,001 |
| | Somatório | 0,81 | 0,66 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,78 | 0,60 | 0,000 |
| Período 3 Início até duas quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,68 | 0,46 | 0,002 |
| | Somatório | 0,70 | 0,48 | 0,001 |
| | Valor médio | 0,67 | 0,44 | 0,003 |
| Período 4 Início até três quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,68 | 0,47 | 0,002 |
| | Somatório | 0,69 | 0,48 | 0,001 |
| | Valor médio | 0,60 | 0,36 | 0,009 |
| Período 5 Início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,65 | 0,42 | 0,003 |
| | Somatório | 0,68 | 0,46 | 0,002 |
| | Valor médio | 0,62 | 0,39 | 0,006 |
| Período 6 Período do ciclo com NDVI superior a 0,30 | Área integrada | 0,76 | 0,58 | 0,000 |
| | Somatório | 0,77 | 0,59 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,54 | 0,29 | 0,021 |

NS – Correlações não significativas ao nível de 95% (P-Valor > 0,05).

Os dados da Tabela 15 mostram que na safra 2003/2004 as correlações mais significativas entre o NDVI e a produtividade da soja ocorreram no período 1, ou seja, quando considerado todo o ciclo produtivo. Neste período, os parâmetros área integrada, somatório e valor médio apresentaram maiores coeficientes de correlação, chegando a 0,84 ($R^2=0,70$) no caso do somatório. Novamente, os parâmetros valor máximo e amplitude não apresentaram bom desempenho, sendo que este último apresentou correlação negativa com a produtividade.

Da mesma forma como constatado na safra 2002/2003, notou-se uma tendência de queda das correlações quando considerados períodos que antecederam o término da safra. Entretanto, verificou-se que essa queda foi mais intensa a partir do período 3 (início até 1 mês antes do fim do ciclo), e não a partir do período 4, como em 2002/2003. Do período 1 ao período 3, o coeficiente de correlação passou de 0,83 a 0,68 (considerando o parâmetro área integrada) e de 0,84 para 0,70 (considerando o somatório). As diferenças entre as correlações dos períodos 1 e 4 foram ainda maiores, porém muito próximas das diferenças constatadas entre os períodos 1 e 5, fato não ocorrido na safra 2002/2003. A Figura 42 ilustra os gráficos das correlações mais

significativas obtidas na safra 2003/2004, nos seis períodos analisados, onde, em todos os casos, foram alcançadas pelo parâmetro somatório.

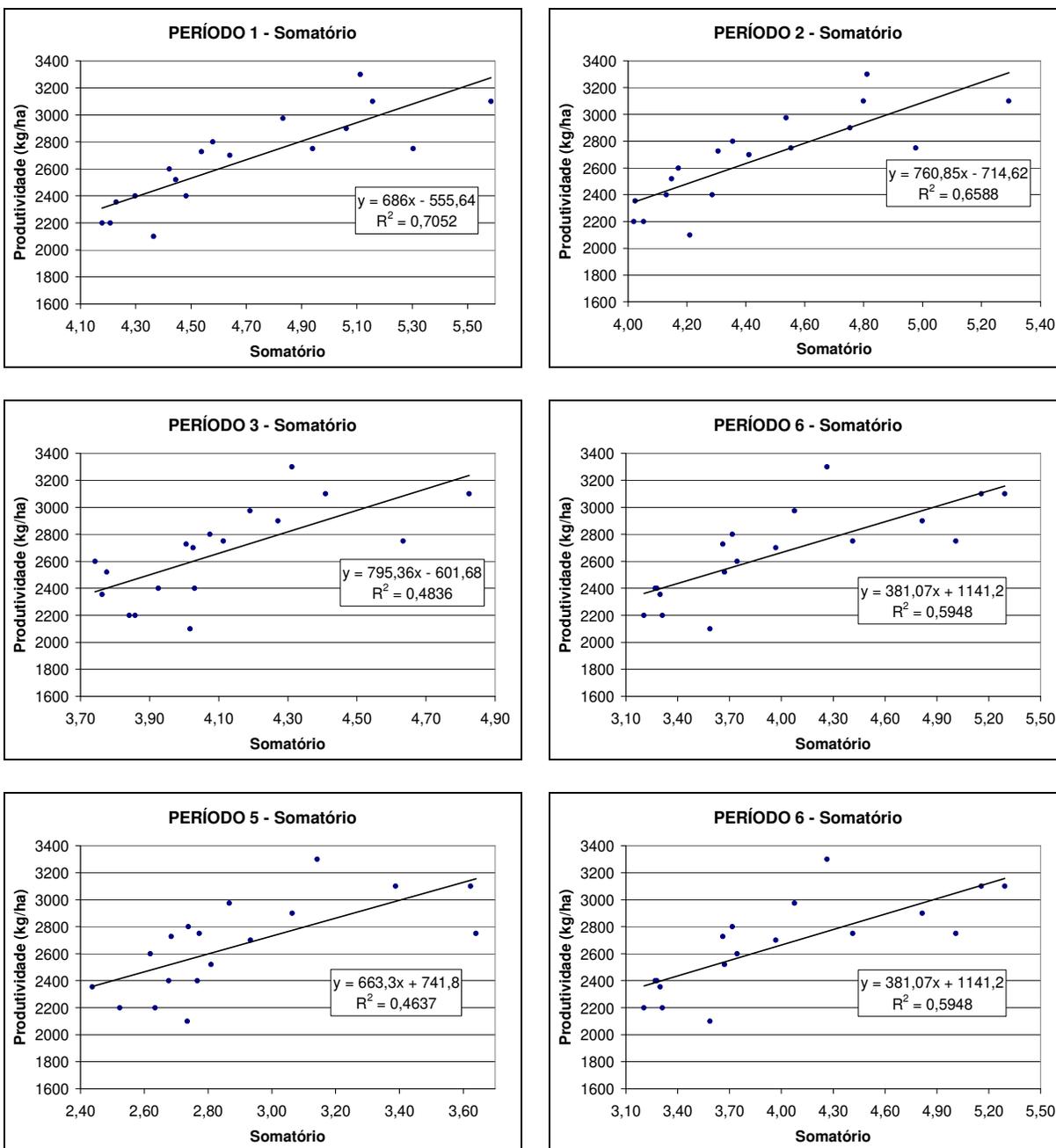


Figura 42. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2003/2004, em cada um dos seis períodos analisados.

Na safra 2003/2004, assim como ilustram os gráficos da Figura 42, 70% da variabilidade da produtividade da soja puderam ser explicados por meio dos perfis temporais do NDVI, quando considerado o período total do ciclo. Em 15 dias do fim do ciclo, 65% da variabilidade foram explicados pelos perfis. Já entre um e dois meses antes do fim do ciclo (períodos 3 à 5), a porcentagem da variabilidade explicada pelos perfis do NDVI oscilou pouco, variando entre 48% e 46%, considerando o parâmetro somatório.

Diferentemente da safra 2002/2003, o período 6 apresentou correlações mais elevadas, alcançando $R=0,77$ ($R^2=0,59$) para o parâmetro somatório.

4.3.3. Safra 2004/2005

A Figura 43 apresenta as composições máximas quinzenais do período de outubro de 2004 a abril de 2005. Verificou-se, novamente, a presença de nuvens nas composições, afetando severamente a composição da 2ª quinzena de outubro. Composições de novembro, dezembro, janeiro e abril também foram afetadas.

As Figuras 44 e 45 ilustram as saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI nos 18 municípios monitorados. Diferentemente das duas safras anteriores, os perfis individuais foram melhor representados pelos perfis médios, havendo poucos casos de diferenças entre eles, como em Boa Esperança, Cascavel e Toledo. Por essas figuras, verificou-se também uma queda acentuada, em quase todos os casos, dos valores do NDVI na 2ª quinzena de abril. Este fato não influenciou a análise do ciclo da soja, mas claramente mostrou uma incoerência, visto que os valores de NDVI deveriam subir em virtude do cultivo de “safrinhas” em muitos municípios. Ao avaliar a composição da 2ª quinzena de abril, verificou-se a presença de pixels com elevado ângulo de varredura, além de contaminação por nuvens. Este problema mostra que o valor de corte sugerido por CHEN et al. (2003) de 42° para o ângulo de varredura máximo aceitável não foi apropriado e deve ser reduzido. Além disso, os classificadores de nuvens devem ser melhorados, principalmente para o aprimoramento da detecção de pixels parcialmente contaminados por nuvens.

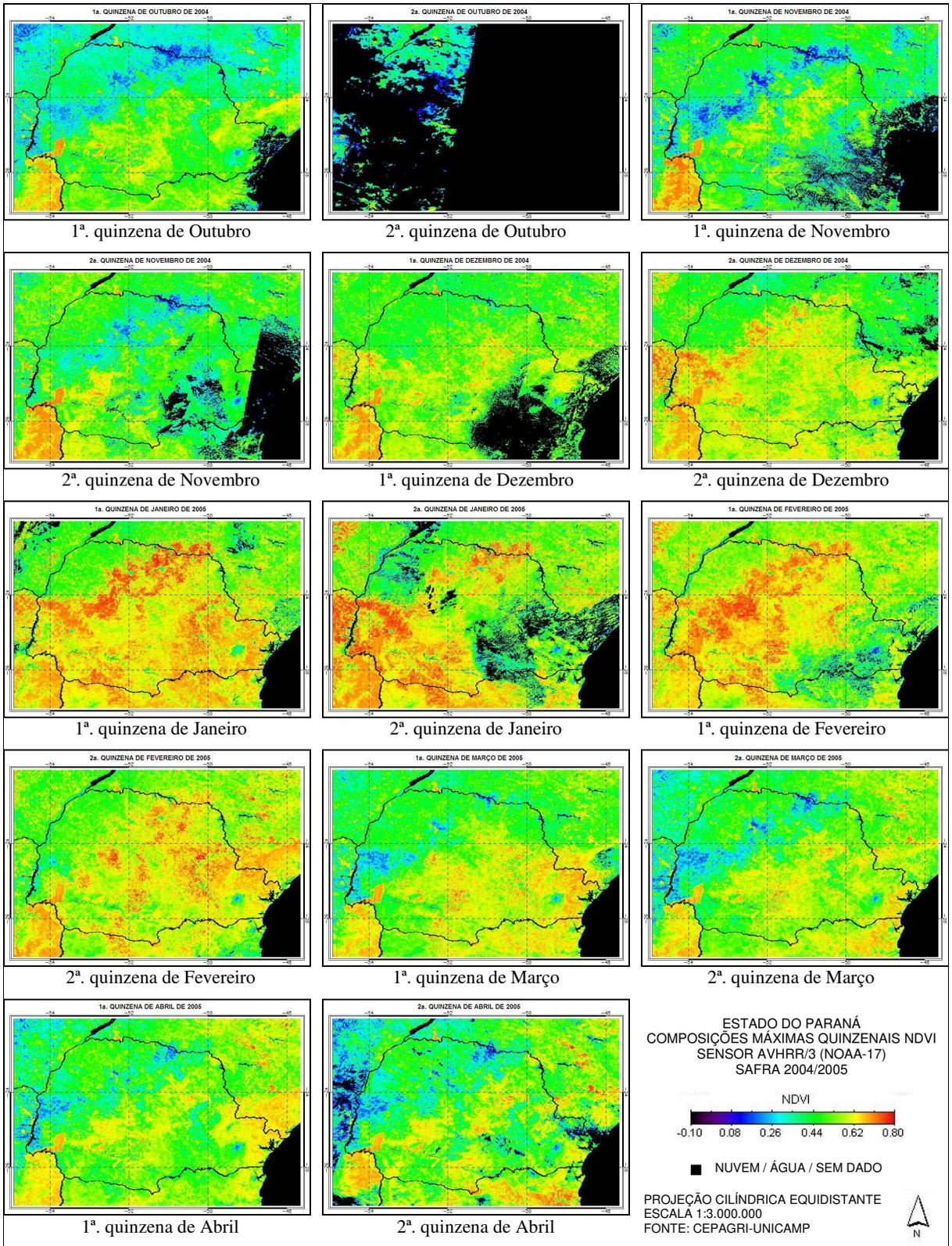


Figura 43. Composições máximas quinzenais de NDVI geradas pelo sensor AVHRR/3 na safra 2004/2005.

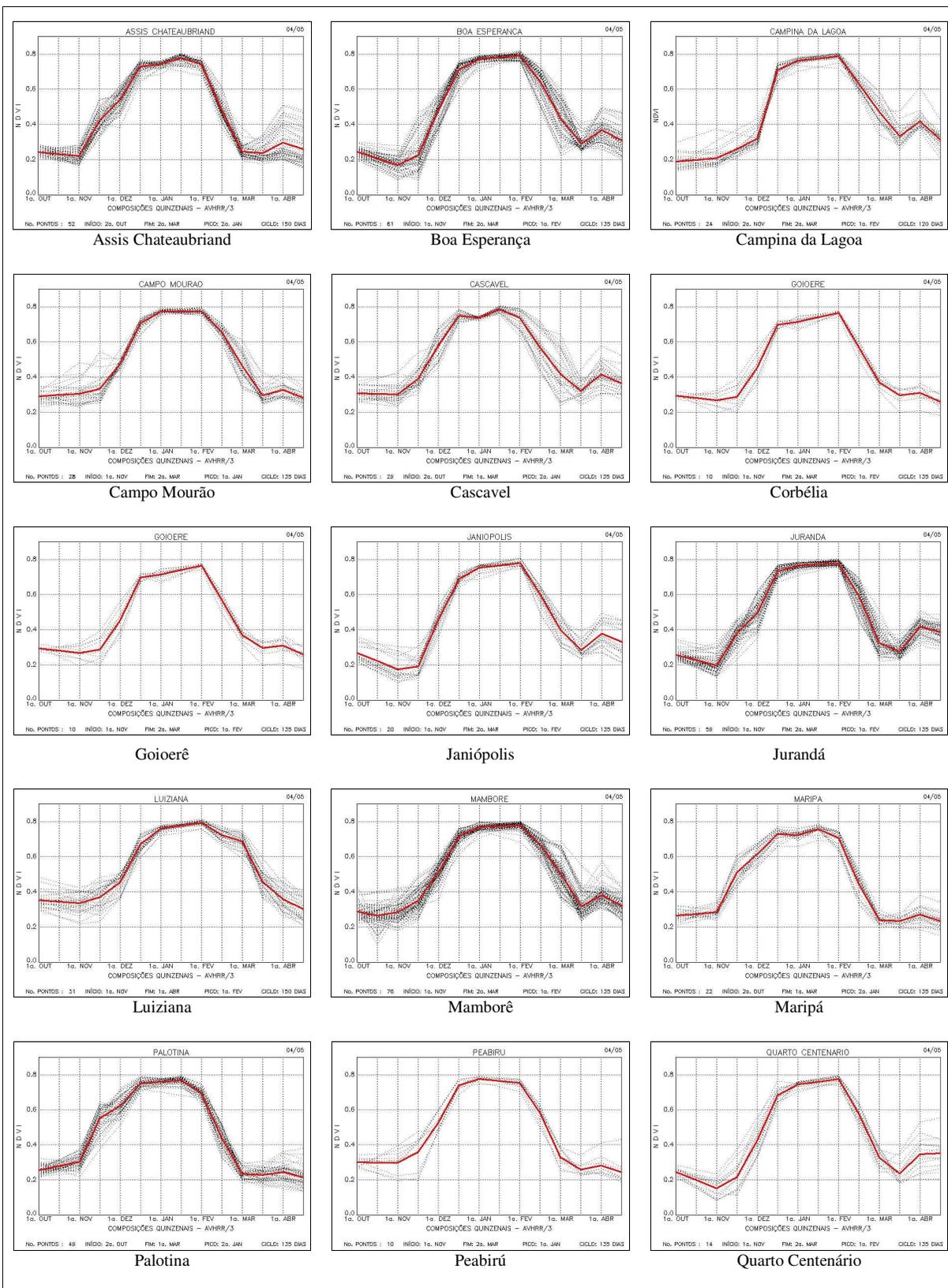


Figura 44. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2004/2005 nos municípios de Assis Chateaubriand à Quarto Centenário.

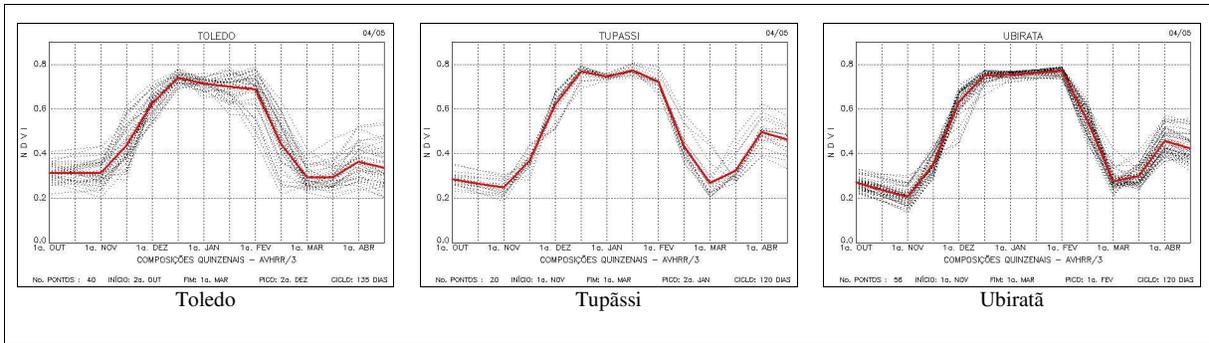


Figura 45. Saídas gráficas dos perfis temporais de NDVI na safra 2004/2005 nos municípios de Toledo à Ubiratã.

O ciclo médio nessa safra foi de 9 quinzenas, ou 135 dias, havendo casos onde se constatou ciclos de 8 e 10 quinzenas (120 e 150 dias, respectivamente). Em quase todos os municípios, os perfis temporais foram afetados por quedas incoerentes do valor do NDVI na composição da 2ª quinzena de janeiro, novamente pelos mesmos motivos já citados. Assim como já relatado, tais valores foram substituídos pela média das composições adjacentes.

A Figura 46 mostra os perfis temporais dos 18 municípios em um único gráfico.

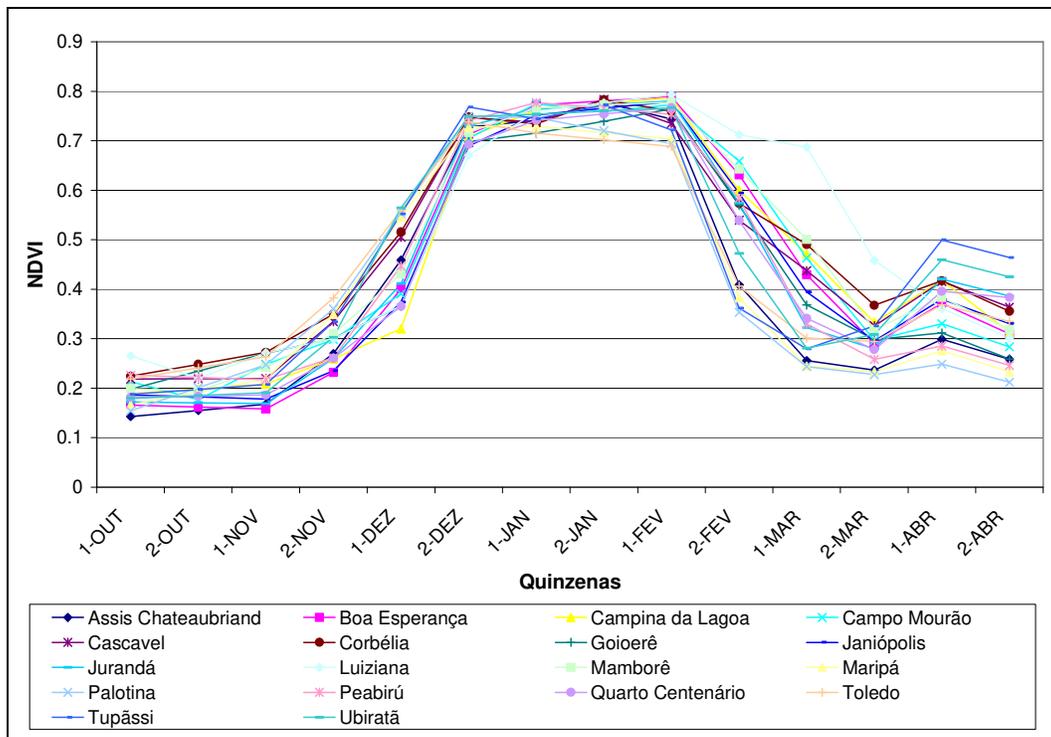


Figura 46. Perfis temporais médios do NDVI nos 18 municípios analisados na safra 2004/2005.

Os perfis temporais mostrados na Figura 46 apresentaram valores máximos em torno de 0,78, número maior que as safras anteriores, constatados nas composições de janeiro e fevereiro. Os valores de pico vegetativo não eram esperados para o mês de fevereiro, fato ocorrido provavelmente pelas falhas apresentadas na composição da 2ª quinzena de janeiro, como já mencionado.

A Tabela 16 mostra os parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI nos períodos 1, 2 e 3 e a Tabela 17 mostra os parâmetros extraídos nos períodos 3, 4 e 5. A Tabela 18 mostra as correlações obtidas entre cada um dos parâmetros e a produtividade média municipal na safra 2004/2005.

Diferentemente do que aconteceu nas safras anteriores, o período 1, abrangendo todo o ciclo produtivo, apresentou correlações mais baixas. Houve uma tendência inversa em relação a 2002/2003 e 2003/2004, onde, agora, os coeficientes de correlação aumentaram na medida em que menores partes do perfil foram consideradas. Levando-se em conta o parâmetro área integrada, os coeficientes de correlação passaram de 0,54 no período 1, para 0,60, 0,67, 0,68 e 0,70 nos períodos 2, 3, 4 e 5, respectivamente. A mesma tendência ocorreu com o parâmetro somatório. Já o parâmetro valor médio apresentou baixos coeficientes de correlação em todos os períodos. No período 1, os parâmetros valor máximo e amplitude apresentaram correlações muito baixas e não significativas, assim como observado nas safras anteriores.

As Figuras 47 e 48 ilustram os gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2004/2005, nos seis períodos analisados. Verificou-se que as melhores correlações ocorreram no período 5 (início até 2 meses antes do fim do ciclo), com $R=0,70$ ($R^2=0,49$), ou seja, nessa safra quase metade da variabilidade da produtividade da soja foi explicada pelos perfis temporais do NDVI, dois meses antes do término do ciclo. Apesar disso, verificou-se que as correlações dos períodos 3 e 4 foram relativamente próximas à correlação do período 5. Já o período 6, envolvendo composições com valores de NDVI superiores a 0,3, apresentou correlações baixas e não significativas. Em todos os casos, os parâmetros área integrada e somatório apresentaram, praticamente, as mesmas correlações, com exceção do período 1, onde a área integrada obteve melhor desempenho.

Tabela 16. Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2004/2005, nos períodos 1, 2 e 3.

| Municípios | Período 1 | | | | | Período 2 | | | Período 3 | | |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>V_max</i> | <i>Amp</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> |
| Assis Chateaubriand | 5,1130 | 5,3575 | 0,4870 | 0,7769 | 0,5581 | 4,8951 | 5,1209 | 0,5121 | 4,4983 | 4,8768 | 0,5419 |
| Boa Esperança | 5,0588 | 5,2783 | 0,5278 | 0,7886 | 0,6186 | 4,6800 | 4,9891 | 0,5543 | 4,1750 | 4,5600 | 0,5700 |
| Campina da Lagoa | 5,3254 | 5,5914 | 0,5591 | 0,7882 | 0,5174 | 4,9796 | 5,2589 | 0,5843 | 4,4267 | 4,7881 | 0,5985 |
| Campo Mourão | 5,2680 | 5,5550 | 0,5555 | 0,7745 | 0,4779 | 4,8961 | 5,2583 | 0,5843 | 4,3372 | 4,7955 | 0,5994 |
| Cascavel | 5,2138 | 5,5646 | 0,5565 | 0,7835 | 0,4808 | 4,7115 | 5,1483 | 0,5720 | 4,0761 | 4,5800 | 0,5725 |
| Corbélia | 5,4887 | 5,8265 | 0,5826 | 0,7829 | 0,4477 | 5,0641 | 5,4631 | 0,6070 | 4,4985 | 4,9729 | 0,6216 |
| Goierê | 4,7842 | 5,0950 | 0,5095 | 0,7650 | 0,4968 | 4,3514 | 4,7269 | 0,5252 | 3,6310 | 4,1597 | 0,5200 |
| Janiópolis | 4,8622 | 5,0894 | 0,5089 | 0,7790 | 0,6045 | 4,4950 | 4,8033 | 0,5337 | 4,0412 | 4,4088 | 0,5511 |
| Jurandá | 5,0804 | 5,3028 | 0,5303 | 0,7803 | 0,5814 | 4,8239 | 5,0254 | 0,5584 | 4,3648 | 4,7028 | 0,5878 |
| Luiziana | 5,6557 | 6,0264 | 0,6026 | 0,7936 | 0,4574 | 5,0657 | 5,5685 | 0,6187 | 4,3742 | 4,8813 | 0,6102 |
| Mamborê | 5,3752 | 5,6581 | 0,5658 | 0,7787 | 0,4936 | 4,9599 | 5,3392 | 0,5932 | 4,3877 | 4,8389 | 0,6049 |
| Maripá | 5,0330 | 5,2801 | 0,5280 | 0,7567 | 0,5180 | 4,6642 | 5,0415 | 0,5602 | 4,1039 | 4,5993 | 0,5749 |
| Palotina | 5,3520 | 5,6146 | 0,5104 | 0,7663 | 0,5392 | 5,1411 | 5,3875 | 0,5387 | 4,7572 | 5,1525 | 0,5725 |
| Peabirú | 5,1148 | 5,3880 | 0,5388 | 0,7772 | 0,5191 | 4,8391 | 5,1299 | 0,5700 | 4,3914 | 4,8009 | 0,6001 |
| Quarto Centenário | 4,9699 | 5,2256 | 0,5028 | 0,8682 | 0,6978 | 4,4895 | 4,8580 | 0,5764 | 3,7954 | 4,4593 | 0,6038 |
| Toledo | 4,9716 | 5,2676 | 0,5268 | 0,7385 | 0,4458 | 4,3424 | 4,8758 | 0,5528 | 4,0048 | 4,5307 | 0,5663 |
| Tupãssi | 4,9471 | 5,2082 | 0,5208 | 0,7722 | 0,5254 | 4,6255 | 4,9411 | 0,5490 | 4,0304 | 4,5108 | 0,5638 |
| Ubiratã | 5,0299 | 5,2751 | 0,5275 | 0,7690 | 0,5584 | 4,6577 | 4,9941 | 0,5549 | 3,9376 | 4,4491 | 0,5561 |
| <i>Média</i> | 5,1469 | 5,4225 | 0,5356 | 0,7800 | 0,5299 | 4,7601 | 5,1072 | 0,5636 | 4,2129 | 4,6704 | 0,5786 |
| <i>Variância</i> | 0,0516 | 0,0645 | 0,0009 | 0,0006 | 0,0043 | 0,0587 | 0,0552 | 0,0008 | 0,0799 | 0,0577 | 0,0007 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,2271 | 0,2539 | 0,0297 | 0,0255 | 0,0655 | 0,2423 | 0,2349 | 0,0278 | 0,2827 | 0,2401 | 0,0267 |

Ai = área integrada sob o perfil no período.

Soma = somatório no período.

V_med = valor médio no período.

V_max = valor máximo no período.

Amp = amplitude no período (valor máximo – valor mínimo).

Período 1: início ao fim do ciclo.

Período 2: início até uma quinzena antes do fim do ciclo.

Período 3: início até duas quinzenas antes do fim do ciclo.

Tabela 17. Parâmetros quantitativos extraídos dos perfis do NDVI durante a safra 2004/2005, nos períodos 4, 5 e 6.

| Municípios | Período 4 | | | Período 5 | | | Período 6 | | |
|----------------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|
| | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> | <i>Ai</i> | <i>Soma</i> | <i>V_med</i> |
| Assis Chateaubriand | 3,9018 | 4,3952 | 0,5494 | 3,1382 | 3,6532 | 0,5219 | 4,0098 | 4,4272 | 0,6325 |
| Boa Esperança | 3,4380 | 3,9198 | 0,5600 | 2,6665 | 3,1313 | 0,5219 | 4,1766 | 4,5938 | 0,6563 |
| Campina da Lagoa | 3,6700 | 4,1766 | 0,5967 | 2,8842 | 3,3884 | 0,5647 | 4,8920 | 5,3206 | 0,5912 |
| Campo Mourão | 3,6013 | 4,1395 | 0,5914 | 2,8293 | 3,3665 | 0,5611 | 4,8961 | 5,2583 | 0,5843 |
| Cascavel | 3,2916 | 3,8439 | 0,5491 | 2,5408 | 3,0604 | 0,5101 | 5,5108 | 5,8731 | 0,5339 |
| Corbélia | 3,7961 | 4,3398 | 0,6200 | 3,0160 | 3,5775 | 0,5962 | 6,1384 | 6,4701 | 0,5392 |
| Goierê | 2,9085 | 3,3946 | 0,4849 | 2,2049 | 2,7029 | 0,4505 | 3,8877 | 4,2584 | 0,6083 |
| Janiópolis | 3,3327 | 3,8147 | 0,5449 | 2,5633 | 3,0357 | 0,5059 | 4,0468 | 4,4365 | 0,6338 |
| Jurandá | 3,6379 | 4,1113 | 0,5873 | 2,8636 | 3,3311 | 0,5552 | 4,4865 | 4,8265 | 0,6033 |
| Luiziana | 3,5952 | 4,1593 | 0,5942 | 2,8109 | 3,3657 | 0,5609 | 6,3010 | 6,6775 | 0,5565 |
| Mamborê | 3,6428 | 4,1727 | 0,5961 | 2,8751 | 3,3941 | 0,5657 | 5,0587 | 5,3730 | 0,5970 |
| Maripá | 3,3680 | 3,8930 | 0,5561 | 2,6369 | 3,1363 | 0,5227 | 4,0400 | 4,4831 | 0,6404 |
| Palotina | 4,2184 | 4,7117 | 0,5890 | 3,4847 | 4,0155 | 0,5736 | 4,5629 | 4,8726 | 0,6091 |
| Peabirú | 3,6987 | 4,2202 | 0,6029 | 2,9405 | 3,4669 | 0,5778 | 5,4276 | 5,7310 | 0,5210 |
| Quarto Centenário | 2,9141 | 3,4352 | 0,5725 | 2,0589 | 2,5609 | 0,5122 | 4,5588 | 4,9395 | 0,7056 |
| Toledo | 3,3332 | 3,8418 | 0,5488 | 2,6312 | 3,1419 | 0,5237 | 4,9356 | 5,2881 | 0,5288 |
| Tupãssi | 3,2597 | 3,7870 | 0,5410 | 2,5103 | 3,0148 | 0,5025 | 4,0806 | 4,4281 | 0,6326 |
| Ubiratã | 3,1870 | 3,6801 | 0,5257 | 2,4418 | 2,9430 | 0,4905 | 4,1418 | 4,5425 | 0,6489 |
| <i>Média</i> | 3,4886 | 4,0020 | 0,5672 | 2,7276 | 3,2381 | 0,5343 | 4,7307 | 5,1000 | 0,6013 |
| <i>Variância</i> | 0,1094 | 0,1106 | 0,0011 | 0,1109 | 0,1187 | 0,0014 | 0,5361 | 0,5116 | 0,0025 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,3307 | 0,3325 | 0,0333 | 0,3330 | 0,3445 | 0,0371 | 0,7322 | 0,7153 | 0,0505 |

Ai = área integrada sob o perfil no período.

Soma = somatório no período.

V_med = valor médio no período.

Período 4: início até três quinzenas antes do fim do ciclo.

Período 5: início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo.

Período 6: período do ciclo com NDVI superior a 0,30.

Tabela 18. Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja na safra 2004/2005.

| Período | Parâmetro | R | R ² | P-Valor |
|--|----------------|-------|----------------|----------|
| Período 1 Início ao fim do ciclo | Área integrada | 0,54 | 0,29 | 0,020 |
| | Somatório | 0,50 | 0,25 | 0,036 |
| | Valor médio | 0,32 | 0,10 | 0,195 NS |
| | Valor máximo | -0,45 | 0,20 | 0,063 NS |
| | Amplitude | -0,42 | 0,18 | 0,081 NS |
| Período 2 Início até uma quinzena antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,60 | 0,36 | 0,008 |
| | Somatório | 0,60 | 0,36 | 0,008 |
| | Valor médio | 0,21 | 0,04 | 0,409 NS |
| Período 3 Início até duas quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,67 | 0,44 | 0,003 |
| | Somatório | 0,67 | 0,45 | 0,002 |
| | Valor médio | 0,28 | 0,08 | 0,257 NS |
| Período 4 Início até três quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,68 | 0,46 | 0,002 |
| | Somatório | 0,69 | 0,47 | 0,002 |
| | Valor médio | 0,45 | 0,20 | 0,064 NS |
| Período 5 Início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,70 | 0,49 | 0,001 |
| | Somatório | 0,70 | 0,49 | 0,001 |
| | Valor médio | 0,57 | 0,32 | 0,014 |
| Período 6 Período do ciclo com NDVI superior a 0,30 | Área integrada | 0,28 | 0,08 | 0,261 NS |
| | Somatório | 0,28 | 0,08 | 0,264 NS |
| | Valor médio | 0,29 | 0,08 | 0,249 NS |

NS – Correlações não significativas (P-Valor > 0,05)

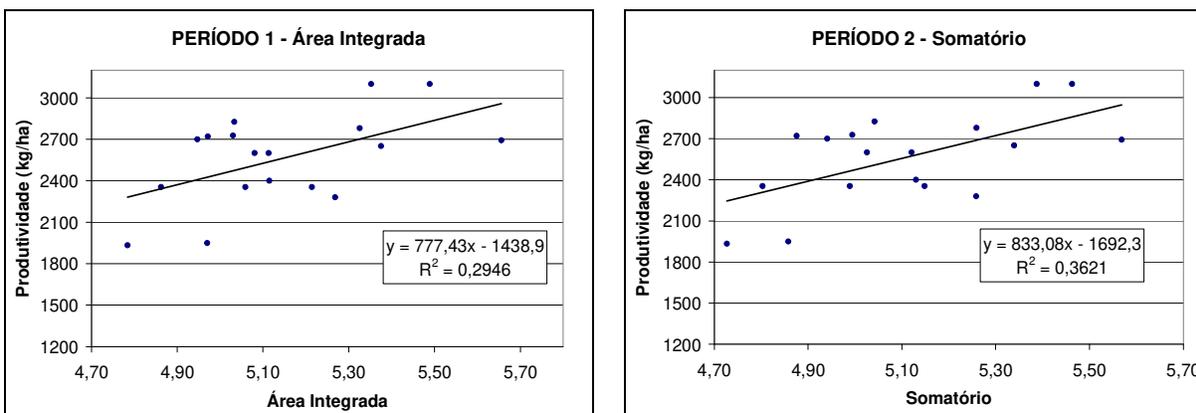


Figura 47. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2004/2005 nos períodos analisados 1 e 2.

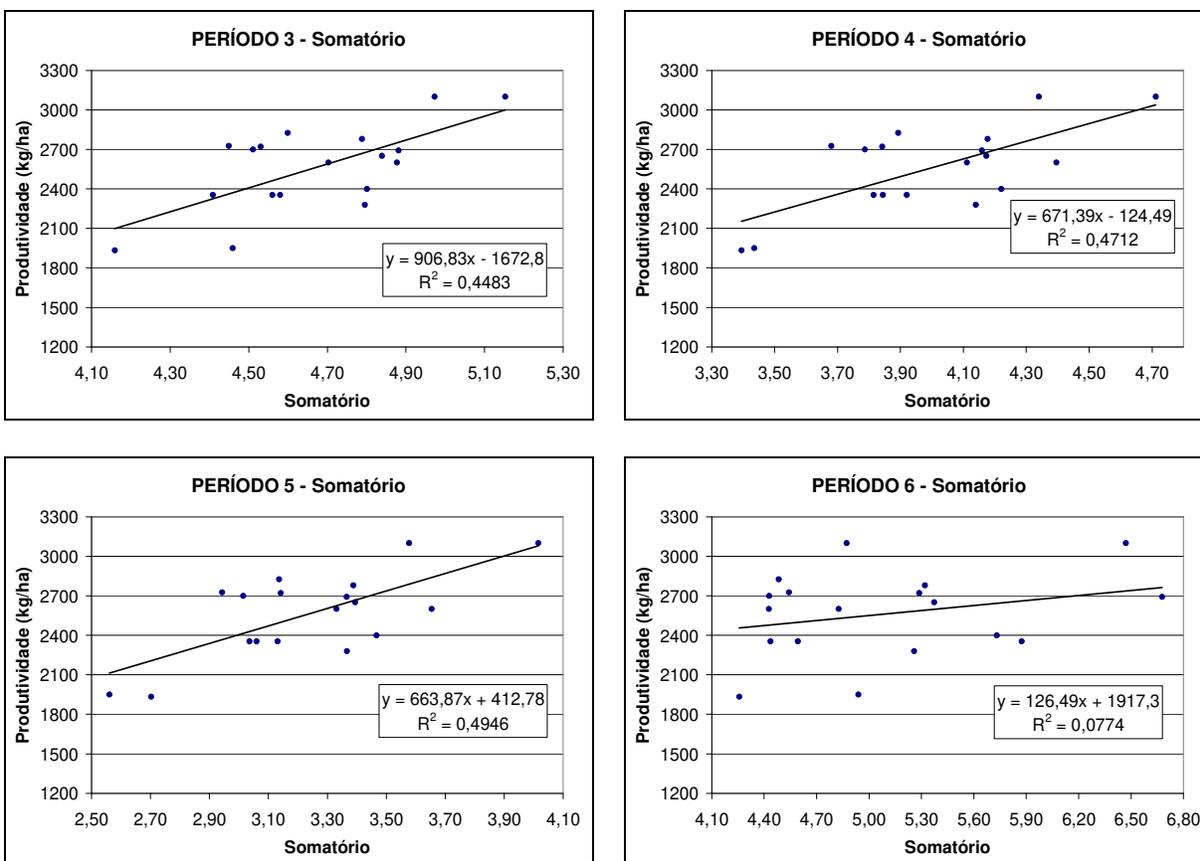


Figura 48. Gráficos das correlações mais significativas obtidas na safra 2004/2005, nos períodos analisados 3 a 6.

4.3.4. Verificação das condições climáticas nas três safras

Para entender melhor as correlações obtidas entre os parâmetros quantitativos do NDVI e a produtividade da soja, foram conduzidas algumas análises para verificar como se deu o andamento da cultura em cada uma das três safras estudadas.

Primeiramente, verificou-se que a média da produtividade nos 18 municípios monitorados apresentou diferenças nas três safras, em virtude de distintas condições climáticas. Na safra 2002/2003, a produtividade média nesses municípios foi de 3.091 kg/ha, valor acima da média histórica na região. Os melhores rendimentos obtidos nesta safra foram decorrentes do bom regime de chuvas, o que favoreceu a não ocorrência de déficit hídrico ao longo do ciclo produtivo, principalmente na fase de enchimento de grãos, momento crítico onde a falta de água acarreta em perda de produtividade. Na safra 2003/2004, a produtividade média nos 18

municípios baixou para 2.689 kg/ha, valor um pouco menor que a média histórica dos últimos 10 anos (2.750 kg/ha), em função principalmente do déficit hídrico causado pelo menor regime de chuvas. Na safra 2004/2005, a produtividade média da soja nos 18 municípios caiu ainda mais, atingindo 2.429 kg/ha, cuja causa foi relacionada à falta de chuvas e ao menor nível de capitalização dos produtores, em decorrência da menor produtividade alcançada na safra 2003/2004, em relação ao que era esperado.

Estes relatos podem ser comprovados ao se observar a evolução de duas variáveis meteorológicas: quantidade de dias acumulados sem chuvas (DASC) e a disponibilidade atual de água no solo (DAAS). Estes dados foram obtidos das estações meteorológicas presentes nos municípios de Assis Chateaubriand, Cascavel, Campo Mourão e Toledo, disponibilizados no AGRITEMPO. As Figuras 49 a 52 ilustram o comportamento das variáveis DASC e DAAS e do perfil temporal do NDVI. Durante a safra 2002/2003, verificou-se, em todos os casos, melhores condições agrometeorológicas durante o cultivo, onde a DAAS se manteve em patamares elevados, principalmente na fase reprodutiva, onde o consumo de água é maior. O mesmo ocorreu com a variável DASC, onde não foram constatados longos períodos de estiagem.

Na safra 2003/2004, foram verificados períodos mais longos de estiagem, principalmente nas composições próximas ao pico vegetativo e nas porções mediana e final dos perfis. Este comportamento refletiu na DAAS, que apresentou menores valores, sobretudo nas épocas de maior demanda hídrica da planta, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. O mesmo foi constatado durante a safra 2004/2005, porém com maior intensidade, como se observa, principalmente, nos casos de Cascavel, Campo Mourão e Toledo.

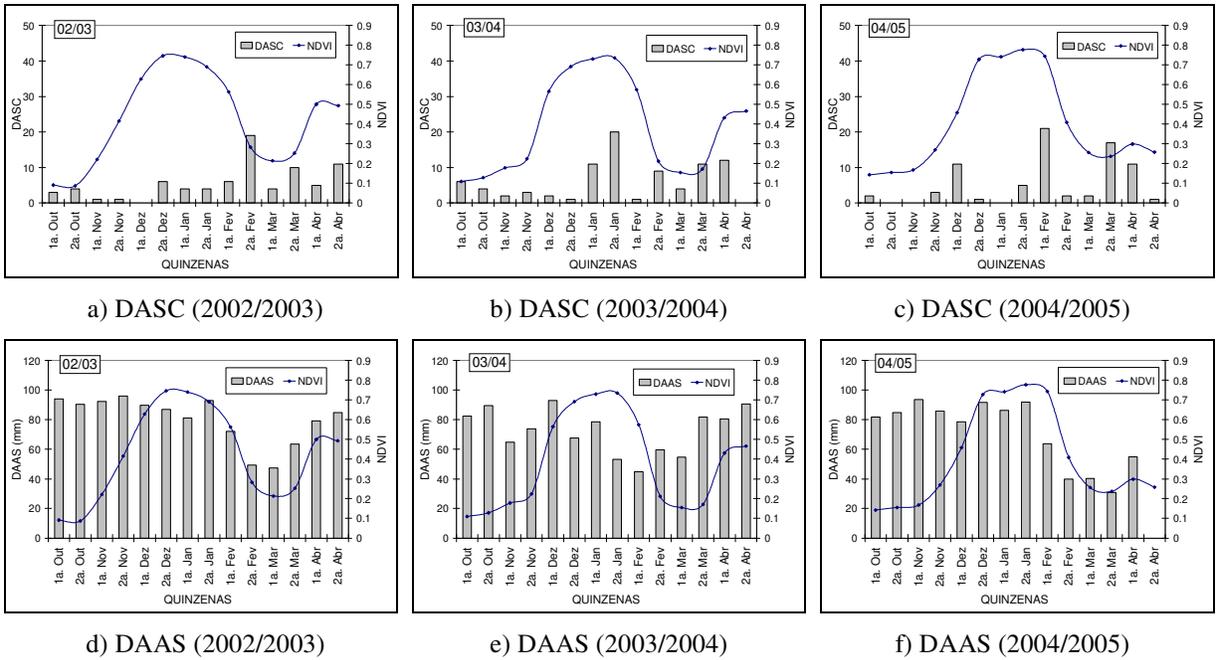


Figura 49. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b, c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Assis Chateaubriand.

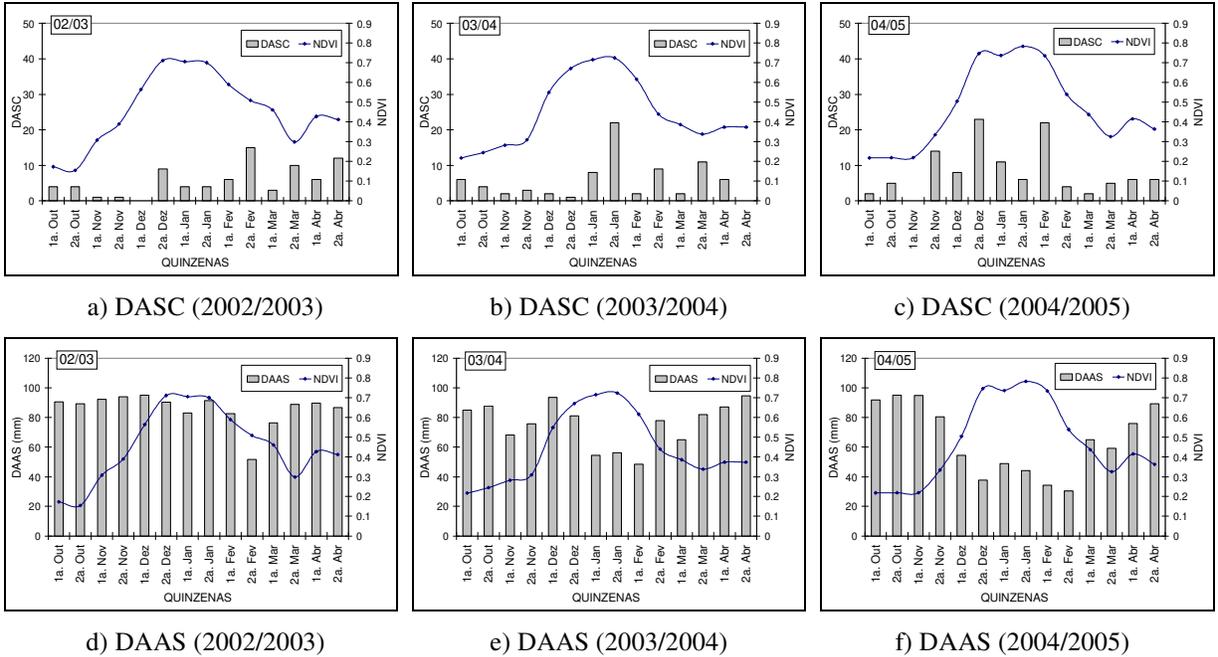


Figura 50. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b, c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Cascavel.

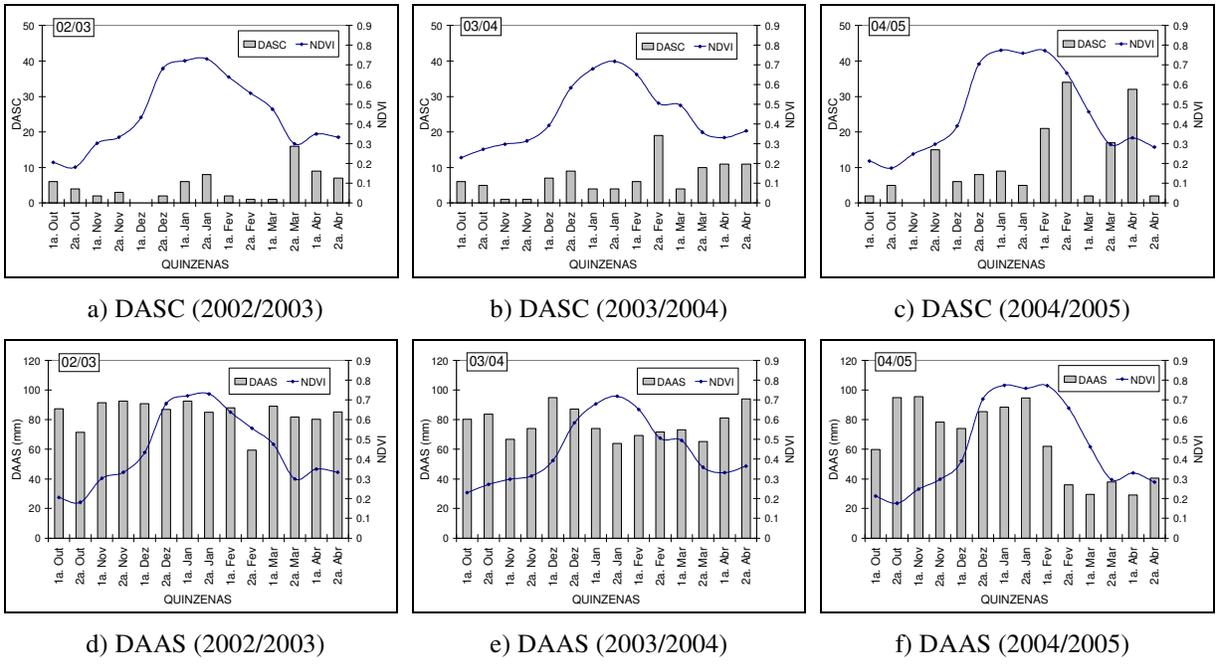


Figura 51. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b, c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Campo Mourão.

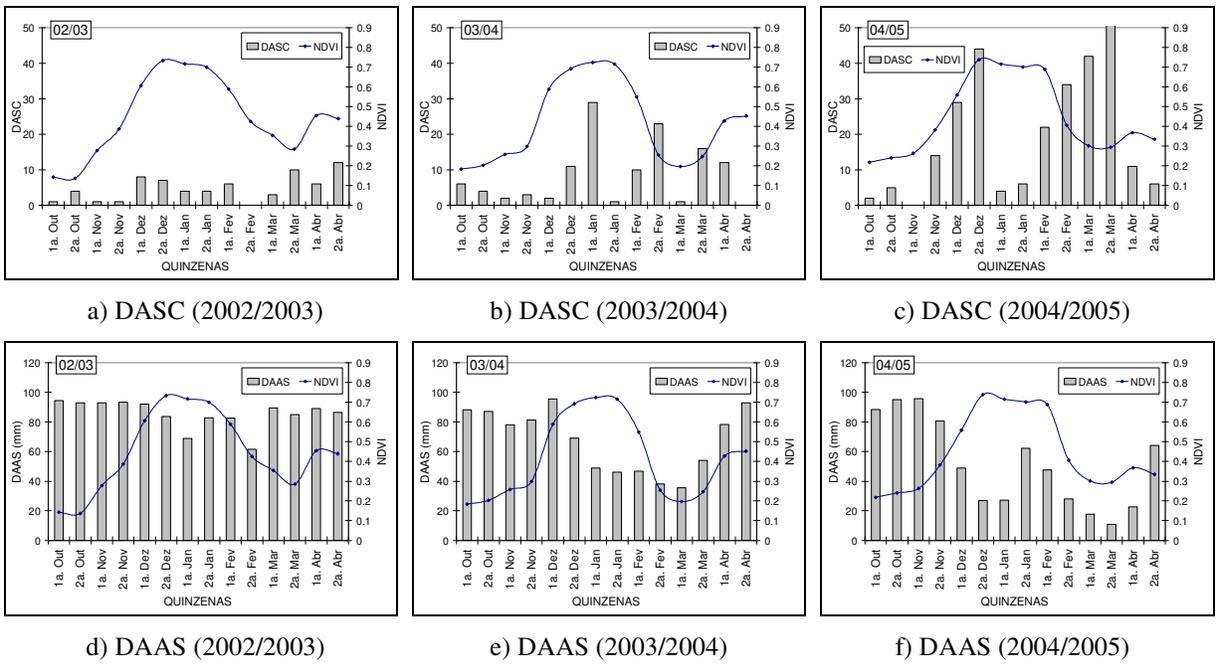


Figura 52. Gráficos da variação dos dias acumulados sem chuva (DASC) nas três safras (a, b e c) e da disponibilidade atual de água no solo (DAAS) nas três safras (d, e, f), na estação de Toledo.

Estes registros referem-se a dados pontuais de quatro municípios e podem não representar, necessariamente, o comportamento meteorológico ocorrido em todas as regiões monitoradas. Entretanto, esses dados exprimem uma mesma tendência, mostrando a ocorrência de possíveis problemas de déficit hídrico nas safras 2003/2004 e 2004/2005. Outra comprovação foi a simulação conduzida por meio de um modelo agrometeorológico, baseado no balanço hídrico, adotando-se a data de plantio na primeira quinzena de novembro. Nesta simulação, a produtividade da soja foi penalizada de acordo com as variáveis meteorológicas medidas no período da safra. As produtividades estimadas normalizadas, ilustradas na Figura 53, ilustram a mesma tendência.

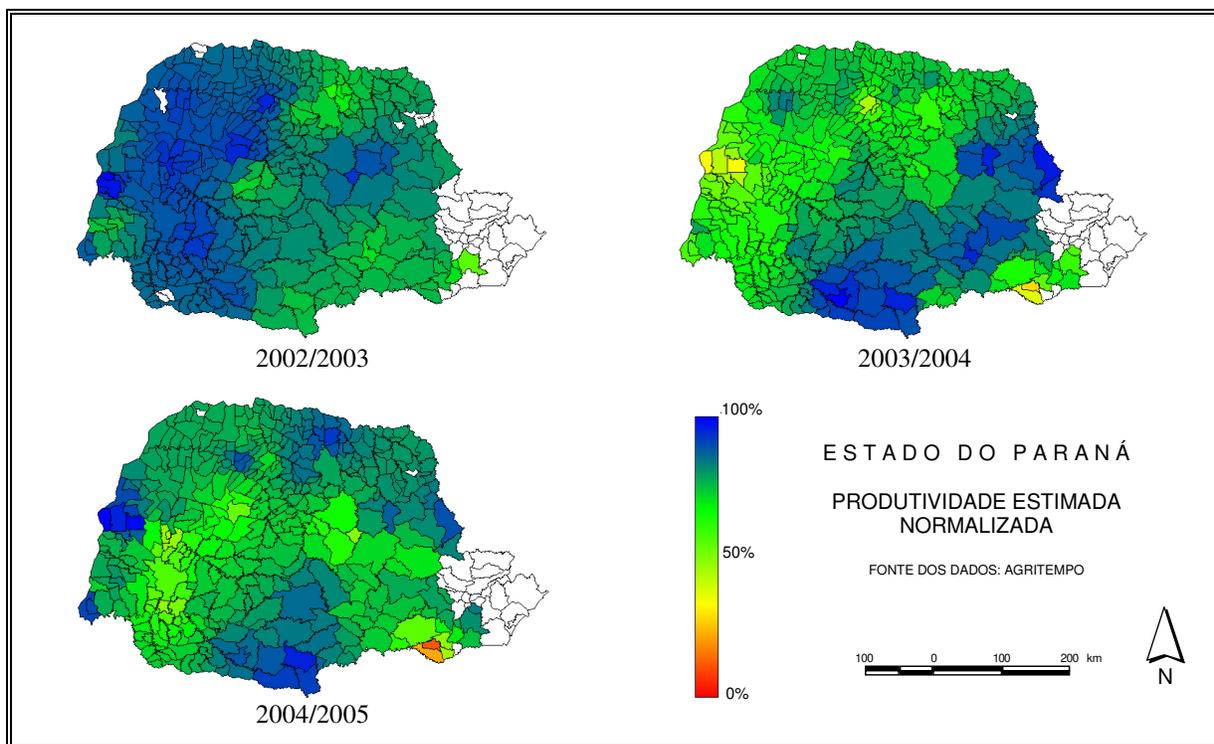


Figura 53. Produtividade normalizada da soja nas três safras, gerada por simulação de modelo agrometeorológico de penalização.

Em 2002/2003, a produtividade normalizada na região foi estimada em valores próximos a 100%, mostrando que as variáveis climáticas influenciaram de maneira positiva no resultado da cultura. Já para as safras 2003/2004 e 2004/2005, a produtividade estimada foi severamente penalizada, evidenciando que as variáveis climáticas tiveram forte influência no resultado final da cultura.

4.3.5. Comparação e discussão das correlações obtidas nas três safras

Como já visto nas análises da correlação NDVI x produtividade, as safras 2002/2003 e 2003/2004 foram semelhantes nos valores dos coeficientes de correlação e apresentaram a mesma tendência: melhores correlações considerando o perfil durante o ciclo inteiro, e piores correlações quando considerados períodos que antecederam o final do ciclo. Entretanto, como constatado, essas duas safras foram diferentes do ponto de vista agrometeorológico. Isto indica que o monitoramento do perfil temporal do NDVI nesses 18 municípios pôde explicar grande parte da variabilidade da produtividade da soja em uma safra com condições climáticas favoráveis e em outra com condições já não tão favoráveis. Considerando o período do início do cultivo até o final, o NDVI explicou 61% ($R=0,78$) e 70% ($R=0,84$) da variabilidade da produtividade da soja na região estudada nas safras 2002/2003 e 2003/2004, respectivamente. LIU e KOGAN (1998) encontraram coeficientes de determinação R^2 variando de 0,22 a 0,62 no monitoramento da soja em várias regiões do Brasil utilizando o VCI (*Vegetation Condition Index*), derivado do NDVI extraído das imagens NOAA.

Estes resultados divergem das afirmações de MKHABELA et al. (2005), que obtiveram menores correlações entre o NDVI e a produtividade quando considerado o perfil inteiro, no caso do milho, e de RASMUSSEN (1992), no caso do milheto. Porém, os resultados confirmam os relatos de LABUS et al. (2002) e HOCHHEIM e BARBER (1998), que obtiveram melhores correlações entre o NDVI e a produtividade do trigo quando considerado o período total do ciclo.

As correlações mais altas obtidas na safra 2003/2004 (70%) em relação à safra 2002/2003 (61%), considerando o período completo do ciclo, podem ser explicadas pelo efeito da saturação do NDVI, evento já relatado por vários autores (SELLERS, 1989; GAMON et al., 1995; CHEN e BRUTSAERT, 1998). Como na safra 2002/2003 houve uma condição climática extremamente favorável, a produção de biomassa foi maximizada. Entretanto, o NDVI é sensível até um certo limite do IAF, acima do qual variações da biomassa não influenciam mais no comportamento do índice de vegetação.

Para comparar os perfis dos três anos, foram elaborados os gráficos das Figuras 54 a 56, que ajudaram a entender porque a safra 2004/2005 apresentou uma tendência inversa em relação às demais safras.

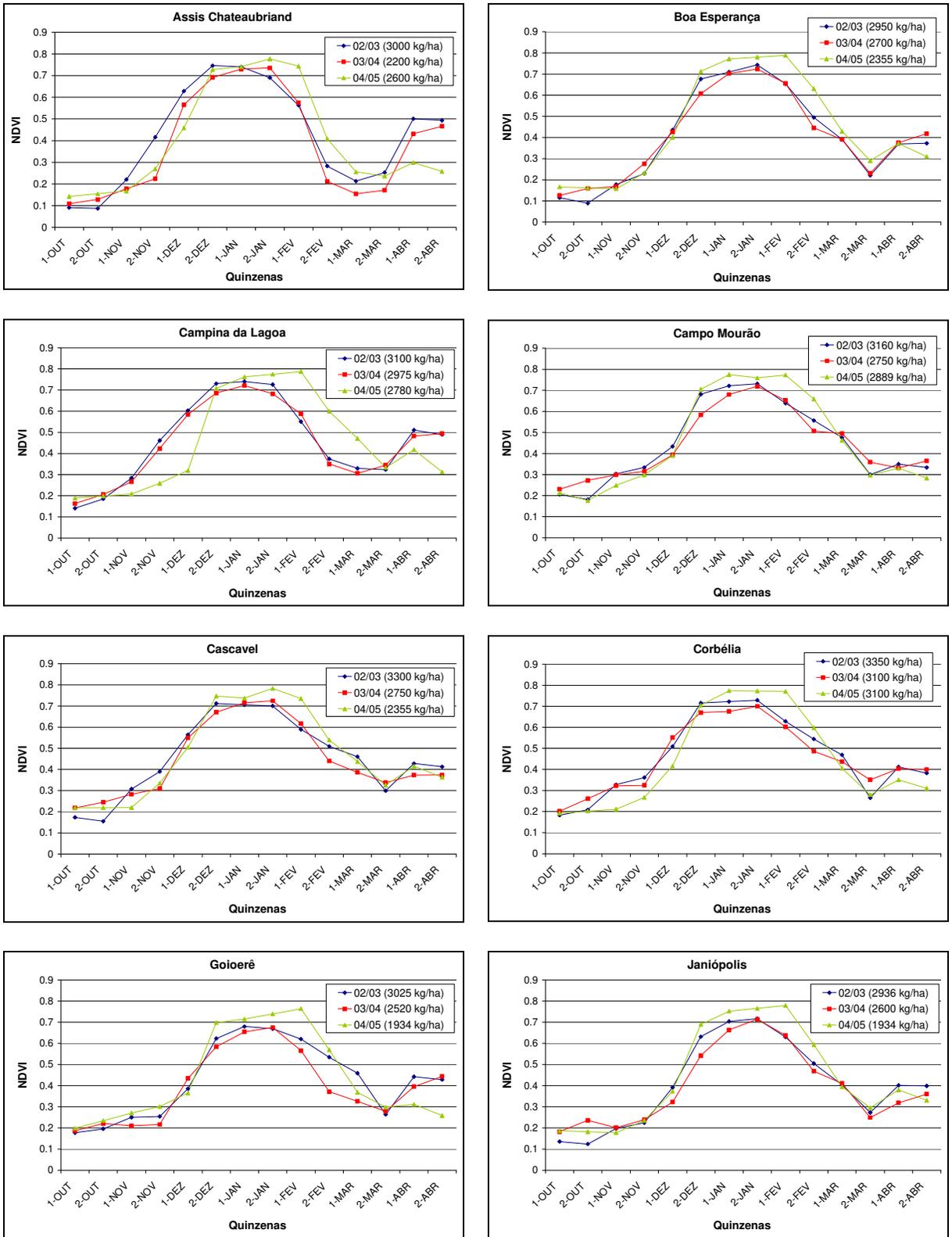


Figura 54. Comparação dos perfis temporais médios de NDVI das safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 nos municípios de Assis Chateaubriand à Janiópolis.

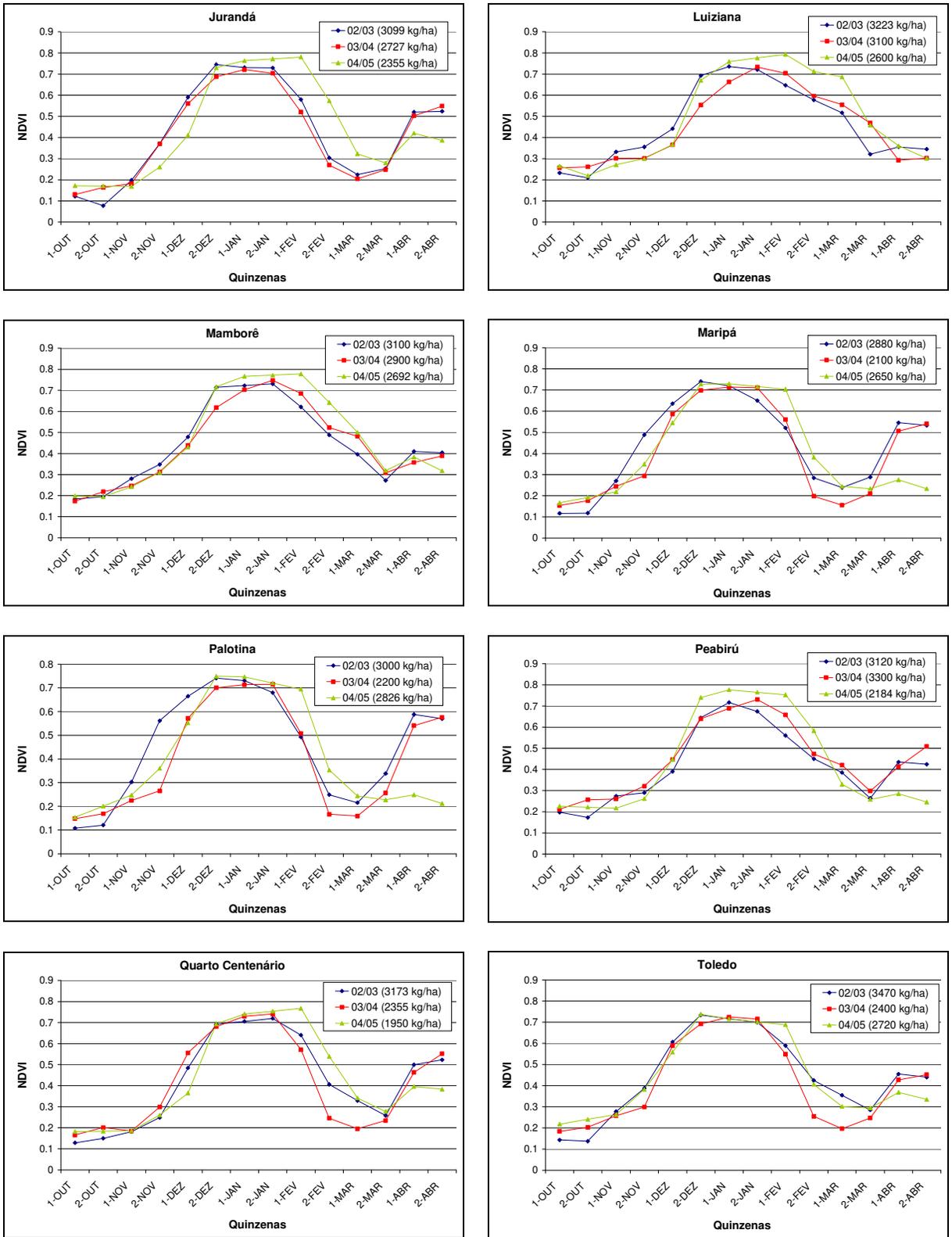


Figura 55. Comparação dos perfis temporais médios de NDVI das safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 nos municípios de Jurandá à Toledo.

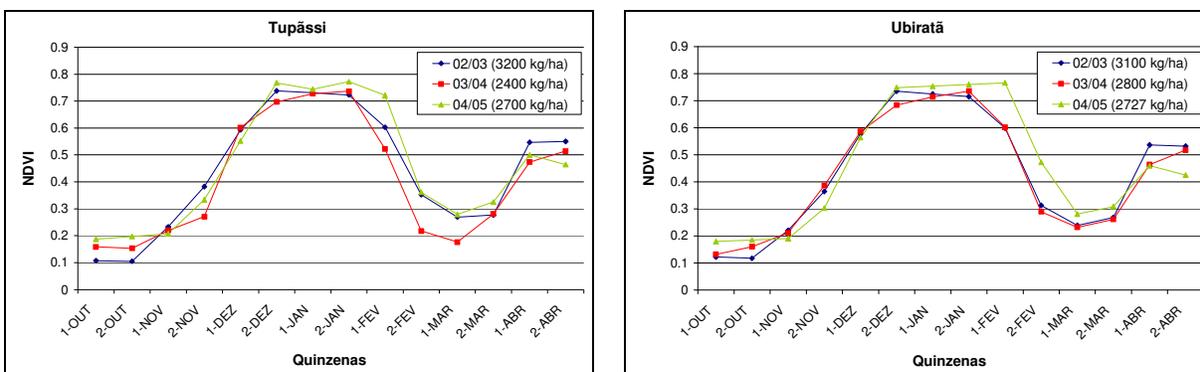


Figura 56. Comparação dos perfis temporais médios de NDVI das safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005 nos municípios de Tupãssi e Ubiratã.

Com exceção de Campina da Lagoa, todos os municípios apresentaram um comportamento semelhante nas três safras. Entretanto, principalmente nas porções mediana e final das curvas, verificou-se que o perfil da safra 2004/2005 (representado pela linha verde) apresentou valores mais altos em relação aos demais perfis.

Este comportamento dos perfis poderia ser explicado por atrasos na semeadura na safra 2004/2005 ou pela duração diferente dos ciclos, fazendo com que os perfis dessa safra ficassem deslocados em relação às demais. Porém, ao observar os municípios de Boa Esperança, Campo Mourão, Cascavel, Goioerê, Janiópolis, Luiziana, Mamborê, Peabirú, Quarto Centenário e Ubiratã, notou-se que os plantios e as colheitas foram quase sempre na mesma data e os perfis no início do ciclo foram semelhantes. Porém, ao considerar as composições finais, o perfil de 2004/2005 parece ter valores de NDVI superestimados. Isso explicaria as baixas correlações obtidas quando considerado o período inteiro do ciclo, onde estas composições finais foram incluídas. Já no período 4 e 5, onde essas composições foram desconsideradas ou tiveram menor peso, as correlações aumentaram e ficaram próximas aos mesmos patamares encontrados nas safras 2002/2003 e 2003/2004.

Tomemos como exemplo o caso de Campo Mourão, onde a produtividade da soja foi de 3.100, 2.750 e 2.889 kg/ha nas safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005, respectivamente. A curva em azul, representando a safra 2002/2003, de forma coerente, apresentou valores mais elevados em quase todo o ciclo quando comparada à curva vermelha, da safra 2003/2004. Já a curva verde, da safra 2004/2005, deveria estar similar à curva vermelha, pois nesses anos a produtividade foi semelhante. Entretanto, entre janeiro e fevereiro, de forma incoerente, a curva

verde apresentou valores superiores às demais safras, indicando que a biomassa da soja estaria elevada, o que não resultou em produtividades elevadas.

A ausência de levantamentos *in loco* não permitiu a definição exata da causa dessa variação dos valores do NDVI na safra 2004/2005. Entretanto, pode-se sugerir que a discrepância desses dados tenha relação com possíveis problemas de calibração radiométrica do sensor AVHRR. Isso porque nas duas primeiras safras foram utilizados coeficientes de calibração de pré-lançamento para os canais 1 e 2, que dão origem ao NDVI. Já na safra 2004/2005, foram empregados, em cada mês, os primeiros coeficientes de calibração de pós-lançamento, divulgados pela NOAA para a plataforma NOAA-17. Seria necessário o processamento de uma maior quantidade de anos para verificar se esse comportamento do NDVI é realmente discrepante ou não.

Foram também realizadas correlações juntando-se os dados das safras 2002/2003 e 2003/2004, conforme mostram os resultados da Tabela 19.

Tabela 19. Correlações obtidas entre os parâmetros do NDVI e a produtividade oficial de soja utilizando os dados das safras 2002/2003 e 2003/2004.

| Período | Parâmetro | R | R² | P-Valor |
|--|------------------|----------|----------------------|----------------|
| Período 1 Início ao fim do ciclo | Área integrada | 0,82 | 0,67 | 0,000 |
| | Somatório | 0,80 | 0,63 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,73 | 0,53 | 0,000 |
| | Valor máximo | 0,33 | 0,11 | 0,049 |
| | Amplitude | -0,10 | 0,01 | 0,551 NS |
| Período 2 Início até uma quinzena antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,76 | 0,58 | 0,000 |
| | Somatório | 0,78 | 0,61 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,69 | 0,48 | 0,000 |
| Período 3 Início até duas quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,75 | 0,56 | 0,000 |
| | Somatório | 0,74 | 0,55 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,60 | 0,36 | 0,000 |
| Período 4 Início até três quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,73 | 0,53 | 0,000 |
| | Somatório | 0,71 | 0,51 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,55 | 0,30 | 0,001 |
| Período 5 Início até quatro quinzenas antes do fim do ciclo | Área integrada | 0,72 | 0,52 | 0,000 |
| | Somatório | 0,71 | 0,51 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,64 | 0,41 | 0,000 |
| Período 6 Período do ciclo com NDVI superior a 0,30 | Área integrada | 0,77 | 0,59 | 0,000 |
| | Somatório | 0,77 | 0,59 | 0,000 |
| | Valor médio | 0,58 | 0,33 | 0,000 |

NS – Correlações não significativas (P-Valor > 0,05)

Optou-se por não incluir os dados da safra 2004/2005, visto que os valores diferiram dos patamares alcançados nas safras anteriores, prejudicando as correlações. A Figura 57 mostra os parâmetros que apresentaram as correlações mais significativas nos períodos 1 a 6.

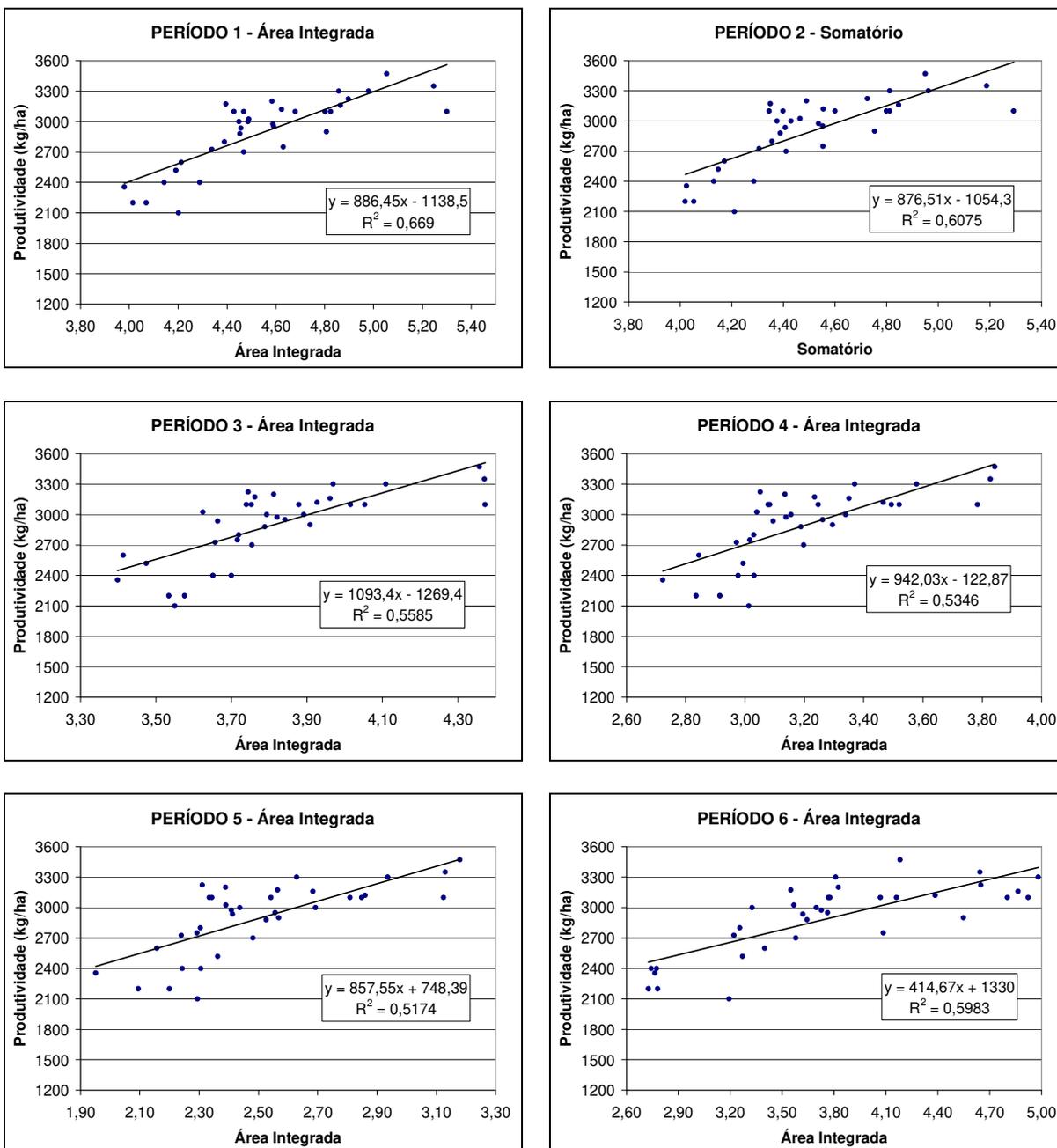


Figura 57. Gráficos das melhores correlações obtidas com dados das safras 2002/2003 e 2004/2005.

Os resultados da Tabela 19 e da Figura 57 mostram as correlações obtidas com 36 pontos, 18 de cada uma das safras. As correlações mais significativas foram observadas no período 1, alcançando um R^2 de quase 67%, considerando o parâmetro área integrada. A mesma tendência observada nessas duas safras individualmente se mantiveram, ou seja, as correlações decresceram quando considerados períodos mais curtos do perfil, chegando a um R^2 de 51% no período 5. Isso indica que dois meses antes do fim da safra, metade da variabilidade da produtividade da soja pôde ser explicada pelos perfis nesses dois anos safras. O parâmetro 6 apresentou bom desempenho, alcançando um R^2 de quase 60%.

4.4. Considerações finais e sugestões

Grande parte deste trabalho foi destinada à busca de ferramentas que pudessem dar origem à infra-estrutura necessária ao desenvolvimento de pesquisas envolvendo séries multi-temporais de imagens AVHRR/NOAA. Um dos desafios mais importantes foi a busca de uma metodologia para o georreferenciamento automático e preciso das imagens AVHRR/NOAA, problema corriqueiro e que poucos softwares no mundo são capazes de resolver. Aliar automação e precisão no georreferenciamento das imagens foi uma tarefa necessária à infra-estrutura do trabalho, em função do grande número de imagens e da necessidade de acurácia geométrica.

A partir dessa demanda, foi desenvolvido um sistema automático de processamento das imagens, baseado numa tecnologia já existente, porém ainda não disponível à comunidade científica. O sistema se mostrou uma ferramenta importante aos usuários de imagens AVHRR/NOAA, principalmente àqueles que fazem uso de grandes séries temporais, por automatizar o processamento e a geração de produtos das imagens. A navegação indireta, aliada à busca automática de feições por meio da MCC, resultou em imagens geometricamente precisas e se mostrou eficaz para o sucesso da automação. Todo sistema é aberto e pode ser aperfeiçoado para a geração de outros produtos úteis a diversas aplicações e, ainda, ser adaptado para georreferenciar imagens de outros sensores.

Outra demanda para a formação da infra-estrutura desta pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema para extração automática da informação espectral presente na série multi-temporal de imagens. Qualquer sistema de monitoramento que se destine à geração de informações em nível regional envolve uma grande quantidade de áreas e, por conseguinte, uma elevada

quantidade de dados. Assim, foi desenvolvido um sistema capaz de extrair essas informações da série de imagens NOAA, tabulá-las e gerar saídas gráficas, descrevendo o comportamento da informação espectral ao longo da série temporal. Esta ferramenta possibilitou a automação da busca por perfis temporais nos 70 municípios inicialmente propostos nesta pesquisa, reduzindo tempo e trabalhos gastos, caso essa análise fosse feita manualmente ou por métodos semi-automáticos.

A infra-estrutura desenvolvida para a análise dos perfis temporais do NDVI permitiu a geração de informações relevantes a serem utilizadas em sistemas de previsão de safras, principalmente em modelos agrometeorológico-espectrais, confirmando a hipótese inicial do trabalho. Estes modelos poderiam incluir variáveis extraídas do NDVI, com pesos diferentes em função da proximidade do término do ciclo. Os resultados podem auxiliar trabalhos como o de SUGAWARA (2001), que apresentou um Sistema de Informações Geográficas baseado num modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa da produtividade da soja, mas relatou dificuldades na inclusão de variáveis derivadas da informação espectral. Ou, ainda, os trabalhos de FONTANA e BERLATO (1998) e MELLO et al. (2003), que verificaram que o componente espectral elevou a precisão de seus modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da soja no Rio Grande do Sul. Entretanto, nesses trabalhos, a resolução espacial das imagens foi excessivamente degradada e não foi conduzida uma análise temporal do termo espectral.

A constatação de que as melhores correlações entre a produtividade da soja e os parâmetros extraídos dos perfis temporais do NDVI tendem a ocorrer quando considerado o ciclo inteiro pode auxiliar as agências governamentais a melhorar as estatísticas agrícolas oficiais, além de poder incluir áreas antes inacessíveis. Porém, as menores correlações identificadas em períodos que antecederam o fim do ciclo mostraram que o NDVI foi menos capaz de explicar a variabilidade da produtividade com suficiente antecipação à colheita.

É importante ressaltar que a análise dos perfis e sua relação com a produtividade da soja foi baseada nos três pressupostos definidos no item 3.2.3. Entretanto, neste trabalho, houve controle apenas do primeiro pressuposto, onde foram feitos esforços, não para eliminar a mistura espectral por completo, mas para reduzi-la o máximo possível e restringir a análise somente à soja. Já no segundo pressuposto, pode-se dizer que foi parcialmente controlado. É sabido que o NDVI apresenta alta correlação com IAF e biomassa. Mas nem sempre alto vigor vegetativo resulta em altas produtividades. Uma cultura pode apresentar um excelente vigor vegetativo,

porém a falta de água em determinados períodos do ciclo fenológico pode interferir na formação das vagens e no enchimento dos grãos, reduzindo a produtividade esperada. É por essa razão que o acompanhamento agrometeorológico é fundamental para entender a existência ou não de correlações entre a produtividade da soja e o NDVI. Já no terceiro pressuposto, não houve qualquer tipo de controle que pudesse indicar seu erro relativo. Este é um problema corriqueiro em trabalhos que envolvem o desenvolvimento de novas metodologias de previsão de safras. Até que ponto confiar nos dados oficiais? Mesmo conhecendo o excelente trabalho feito pelos profissionais da SEAB/DERAL, não se sabe ao certo a acurácia dessas estatísticas, conduzidas muitas vezes por métodos subjetivos. Estas razões podem ilustrar porque os parâmetros extraídos dos perfis do NDVI não foram capazes de explicar *toda* a causa de variação da produtividade da soja, mas sim *parcialmente*.

As composições quinzenais mostraram-se menos sensíveis às variações do NDVI em virtude da contaminação por nuvens. Entretanto, o período de 15 dias entre as composições dificultou a definição das datas de plantio e colheita, sendo que para essa finalidade, as composições decendiais mostraram-se mais eficientes. As composições decendiais não foram utilizadas na análise das correlações devido ao fato de possuírem seqüências consecutivas de composições com nuvens, onde a interpolação não funcionou a contento. Para tentar reduzir a quantidade de nuvens nas composições decendiais, sugere-se a utilização de imagens provenientes de mais de um sensor, com horários de passagem diferentes. No entanto, soluções para reduzir os efeitos da reflectância bidirecional devem ser conduzidas para evitar que medições em horários diferentes possam dar origem a valores de NDVI discrepantes.

Um fator limitante da metodologia é a necessidade de imagens de média resolução espacial para identificação das áreas produtoras. Este passo demanda tempo para a geração de classificações supervisionadas e nem sempre essas imagens são disponíveis gratuitamente. Uma alternativa que se sugere é utilizar as próprias imagens NOAA para identificar as áreas produtoras, o que poderia ser feito por meio das técnicas de mistura espectral ou da lógica *fuzzy*, como relatado por ANTUNES (2005). Estas técnicas poderiam trazer bons resultados, pois seriam aplicadas não para quantificar as regiões produtoras, mas para delimitar pixels puros ou com mínima mistura espectral, onde a análise do NDVI poderia ser feita de maneira mais pura. Outra alternativa às imagens de média resolução seria utilizar os perfis temporais do NDVI gerados numa safra para o desenvolvimento de assinaturas espectrais-temporais, que poderiam

alimentar classificadores supervisionados aplicados às próprias imagens NOAA em outros anos safras.

Para os futuros trabalhos, sugere-se utilizar a infra-estrutura e as metodologias aqui desenvolvidas e de domínio público para expandir a análise à outras partes do Estado, ou à outras regiões do país, em uma série histórica mais longa de imagens. Além disso, o sistema de geração automática de perfis pode ser aperfeiçoado para a extração de uma maior quantidade de parâmetros quantitativos (como aqueles descritos por HILL e DONALD, 2003), ou ainda ser alimentado com imagens de outros sensores de elevada resolução temporal, como SPOT/Vegetation e MODIS.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema automático de processamento das imagens AVHRR/NOAA possibilitou a total automatização dos procedimentos, desde a conversão do formato bruto até a geração de produtos, incluindo a etapa de georreferenciamento, que usualmente demanda intensa intervenção humana. Quando não cobertas totalmente por nuvens, as imagens puderam ser corrigidas geometricamente com erros de posicionamento não superiores a um pixel.

A infra-estrutura desenvolvida neste trabalho, incluindo o sistema para extração automática dos dados espectrais, permitiu o uso otimizado das geotecnologias na análise multi-temporal do NDVI, gerando informações relevantes a serem utilizadas em sistemas de previsão de safras, confirmando a hipótese inicial do trabalho. Os resultados obtidos no estudo da cultura da soja no Estado do Paraná, em nível municipal, mostraram que o monitoramento dos perfis temporais do NDVI gerou informações com potencial de uso em modelos agrometeorológico-espectrais.

Em dois anos-safra (2002/2003 e 2003/2004) foram observadas maiores correlações entre a produtividade da soja e o NDVI quando todo o ciclo produtivo foi considerado, chegando-se a coeficientes R^2 de 0,61 e 0,70, respectivamente. Quando considerados períodos com antecedência à colheita, as correlações foram menos significativas. O acompanhamento agrometeorológico mostrou que estes dois anos-safra apresentaram regimes de chuvas distintos, evidenciando que grande parte da variabilidade da produtividade pôde ser explicada em um ano-safra com clima favorável e em outro ano-safra com problemas de déficit hídrico. Já para outro ano safra (2004/2005), houve uma tendência inversa, com correlações entre o NDVI e a produtividade da soja mais significativas quando considerados períodos com antecedência à colheita.

Embora o trabalho tenha sido restrito a apenas uma região do Estado do Paraná, pode-se dizer que traz contribuições em termos de metodologias e de infra-estrutura, além de apresentar tendências observadas entre o comportamento dos perfis do NDVI e sua correlação com a produtividade da soja. Diversas pesquisas já tinham mostrado a potencialidade do NDVI, mas poucos fizeram uso de parâmetros extraídos dos perfis temporais, considerando várias fases do ciclo produtivo.

Estes resultados mostraram que as imagens AVHRR/NOAA, a despeito de sua baixa resolução espacial, apresentam potencial de uso para fins de previsão agrícola, ainda que os parâmetros do NDVI puderam ser capazes de explicar apenas parcialmente a variabilidade da produtividade. Sugere-se utilizar a infra-estrutura aqui apresentada para ampliar esta análise a outras partes do Brasil ao longo de uma série histórica mais longa, incluindo regiões do Centro-Oeste do país, onde a estrutura fundiária mostra-se mais adequada para uso de imagens de menor resolução espacial. Sugere-se também o uso de técnicas de mistura espectral ou lógica *fuzzy* para identificar as áreas produtoras, a fim de evitar a necessidade da utilização de imagens de média resolução espacial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRITEMPO **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. Disponível em <<http://www.agritempo.gov.br>>. Acessado em 21 set. 2006.

AIGNER, E.; COPAA, I.; WIENEKE, F. Crop yield estimation using NOAA-AHRR data and meteorological data in the Eastern Wimmera (South Eastern Australia). **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.23, Part B7, p.19-26, 2000.

ANTUNES, J.F.G. **Aplicação de lógica fuzzy para estimativa de área plantada da cultura de soja utilizando imagens AVHRR/NOAA**. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. 2005.

ANTUNES, J.F.G.; ESQUERDO, J.C.D.M. Geração automática de produtos derivados de imagens AVHRR-NOAA para monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2007. No prelo.

ÁVILA, A.M.H.; PINTO, H.S.; NERY, L.A.; FREITAS, G.M. Uso de dados de radar e de satélites meteorológicos em modelos de previsão de chuvas intensas em centros urbanos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.4815-4817. CD-ROM.

BARET, F.; GUYOT, G. Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, p.161-173, 1991.

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D.J. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. **Photogrammetria**, v.43, n.5, p.241-256, 1989.

BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos, 94p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987.

BERNARD, A.C.; WILKINSON, G.G.; KANELLOPOLOUS, I. Training strategies for neural network soft classification of remotely-sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.8, p.1851-1856, 1997.

BIGGAR, S.F.; SLATER, P.N.; GELLMAN, D.I. Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4-1.1 mm range. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, p. 245-252, 1994.

BRUNEL, P.; MARSOUIN A. Systematic navigation error on NOAA-12 AVHRR images. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.171-176, 1993.

CAMPBELL, J.B. **Introduction to Remote Sensing**. New York: Guilford Press, 1987.

CARAMORI, P.H.; ESQUERDO, J.C.D.M.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.D. Análise da ocorrência de geadas no Estado do Paraná com base na temperatura de superfície obtida dos dados AVHRR/NOAA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.5623-5629. CD-ROM.

CHACÓN-MORENO E.J. Mapping savanna ecosystems of the Llanos del Orinoco using multitemporal NOAA satellite imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, p.41-53, 2004.

CHEN, D.; BRUTSAERT, W. Satellite-sensed distribution and spatial patterns of vegetation parameters over tall grass prairie. **Journal of Atmospheric Sciences**, v.55, 1225- 1238, 1998.

CHEN, P.Y.; SRINIVASAN, R.; FEDOSEJEVS, G.; KINIRY, J.R. Evaluating different NDVI composites techniques using NOAA-14 AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.17, p.3403-12, 2003.

CHEN, P. Y., SRINIVASAN, R., FEDOSEJEVS, G., NARASIMHAN, B. An automated cloud detection method for daily NOAA-14 AVHRR data for Texas, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.15, p.2939-2950, 2002.

CLEVERS, J. G. P. W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v.32, p.53-70, 1988.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safras**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 10. fev. 2005.

CRIPPEN, R. E. Calculating the Vegetation Index Faster. **Remote Sensing of Environment**, v.34, p.71-73, 1990.

DALEZIOS, N.R.; DOMENIKIOTIS, C.; LOUKAS, A.; TZORTZIOS, S.T.; KALAITZIDIS, C. Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI. **Physical Chemistry of the Earth**, v.26, n.3, p.247-251, 2001.

DALL'AGNOL, A. Na crista da onda. **Portal do agronegócio**. Disponível em <<http://www.portaldoagronegocio.com.br>>. Acesso em 24 out. 2006.

DEERING, D.W.; ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. Measuring “Forage Production” of grazing units from Landsat MSS data. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10., Ann Harbor, 1975. **Proceedings...** University of Michigan, 1975, v.2, p.1169-1178.

DINGUIRARD, M.; SLATER, P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n.3, p.194-205, 1999.

DORAISWAMY, P. D.; COOK, P. W. Spring wheat yield assessment using NOAA AVHRR data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.21, p.43-51, 1995.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations, 1979. 193p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, n.33).

EMBRAPA SOJA (EMBRAPA/CNPQ) **Tecnologia de produção de soja – Paraná – 2003**. Londrina: Embrapa Soja, 2003. 195p.

EMBRAPA SOJA (EMBRAPA/CNPQ) **Tecnologia de produção de soja – Paraná – 2005**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. 224p.

EMERY, W.J.; BALDWIN, D.; MATTHEWS, D. Maximum cross correlation automatic satellite image navigation and attitude corrections for open-ocean image navigation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.1, 33-42, 2003.

EMERY, W.J.; BROWN, J.; NOVAK, Z.P. AVHRR image navigation: Summary and Review. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.55, p.1175-1183, 1989.

EMERY, W.J., FOWLER, C.W.; CLAYSON, C.A. Satellite image derived Gulf Stream currents. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.9, p.285-304, 1992.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ANTUNES, J. F. G.; BALDWIN, D. G.; EMERY, W.J.; ZULLO JÚNIOR An automatic system for AVHRR land surface product generation, **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.18, p.3925-3942, 2006.

EUGENIO, F.; MARQUÉS, F. Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.12, 2869-2880, 2003.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R.; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001. (Número Especial).

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. CD-ROM.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 12 p., 1981. (Special Report, 80).

FOODY, G. M. Sharpening fuzzy classification output to refine the representation of sub-pixel land cover distribution. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.13, p.2593-2599, 1998.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento de soja no Rio Grande do Sul: um estudo preliminar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998, p.17-24. CD-ROM.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELLO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.3, p.339-403, 2001.

FONTANA, D.C.; WEBER, E.; DUCATI, J.; FIGUEIREDO, D.C; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. A case study for crop monitoring and harvest forecast in south Brazil. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 28., 2000, Cape Town. **Proceedings...** ICRSE, 2000. p.91-94.

FRANÇA, G.B.; CRACKNELL, A.P. A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, p.1697-1705, 1995.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; GOULDEN, M. L.; GRIFFIN, K. L.; HARTLEY, A. E.; JOEL, G.; et al. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation type. **Ecological Applications**, v.5, 28-41, 1995.

GANAN, J. R.; ROCHA, J. V.; MERCANTE, E.; ANTUNES, J. F. G. Mapeamento da cultura da soja com imagens LANDSAT 5/TM utilizando algoritmos de classificação supervisionada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p.549-555. CD-ROM.

GAO, B.C.; HEIDEBRECHT, K.B.; GOETZ, A.F.H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v.44, n.2-3, p.165-178, 1993.

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

GUYOT G. **Signatures spectrales des surfaces naturelles**. Collection “Télédétection stellitaire”. Caen: Édition Paradigme, 1989, 178p.

HAYES, M. J.; DECKER, W. L. Using NOAA AVHRR data to estimate maize production in the United States corn belt. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p.3189-3200, 1996.

HILL, M.J.; DONALD, G.E. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, v.84, p.367-384, 2003.

HO, D.; ASEM, A. NOAA AVHRR image referencing. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.7, p.895-904, 1986.

HOCHHEIM, K.P.; BARBER, D.G. Spring wheat yield estimation for Western Canada using NOAA NDVI data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.24, n.1, 1998.

HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, Inc. 1978. cap 5, p.227-289.

HOLBEN, B.N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.11, p.1417-1435, 1986.

HOLBEN, B.N.; TUCKER, C.J.; CHENG-JENG, F. Spectral assessment of soyabean leaf area and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.46, n.5, p.651-656, 1980.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p.53-70, 1988.

HUETE, A.R.; JUSTICE, C.O.; VAN LEEUWEN, W. MODIS Vegetation Index (MOD13), EOS MODIS Algorithm-Theoretical Basis Document. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771.

HYMOWITZ, T. On the domestication of the soybean. **Economic Botany**, v.24, p.408-421, 1970.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR) **Classificação Climática**. Disponível em <http://www.iapar.br/Sma/Cartas_Climaticas/Classificacao_Climatica.htm>. Acesso em 12 nov. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) Projeto de reavaliação metodológica e de construção de painéis de amostras de área para estimativas de safras agrícolas. Contrato IBGE/IPEA, Rio de Janeiro, 1989. 27p.

IPPOLITI-RAMILO, G.A.; EPIPHANIO, J.C.N.; SHIMABUKURO, Y.E. FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.46, n.1, p.89-101, 1999.

JACKSON, R.D. Spectral indices in n-Space. **Remote Sensing of Environment**, v.13, p.409-421, 1983.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, n. 3-4, p. 185-200, 1991.

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, 2002.

JIN, S.; SADER, S. A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. **Remote Sensing of Environment**, v.94, n.3, p.364-372, 2005.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v.30, p.833-845, 2004.

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

JUSTICE, C.O.; HIERNAUX, P.H.Y. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data: Niger, 1983. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.11, p.1475-1498, 1986.

KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The Tasseled Cap – A graphic description of the spectral temporal development agricultural crops as seen by Landsat. In: Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. **Proceedings...** West Lafayette: Purdue University, p.41-51.

KIDWELL, K. (Ed.) **NOAA polar orbiter data user's guide**. Washington, D.C.: NOAA/NESDIS/NCDC/CSD/SSB, 1995.

LABUS, M.P.; NIELSEN, G.A.; LAWRENCE, R.L.; ENGEL, R.; LONG, D.S. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.23 n.20, p.4169-4180, 2002.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LE MOIGNE, J; CAMPBELL, W.J.; CROMP, R.F. An automated parallel image registration technique based on the correlation of wavelet features. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, n.8, p.1849-1864, 2002.

LEESE, J.A.; NOVAK, C.S.; CLARKE, B.B. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. **Journal of Applied Meteorology**, v.10, p.110-132, 1971.

LIU, W.T.; KOGAN, F. Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.6, p.1161-1179, 2002.

LUCCHESI, A.A. Fatores da produção vegetal. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Eds.) **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987, p.1-11.

LUIZ, A.J.B.; EPIPHANIO, J.C.N. Amostragem por pontos em imagens de sensoriamento remoto para estimativa de área plantada por município. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001, p.111-118. CD-ROM.

MARTINKO, E.A.; PRICE, K.P.; EGBERT, S.L. WHISTLER, J.L.; JAKUBAUSKAS, M.E. CROOKS, T.J. Building three decades of remote sensing and decision support: The NASA Great Plains RESAC and the Kansas Applied Remote Sensing (KARS) Program. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.66, n.10, p.1158-1165, 2000.

MELLO, R.W.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Modelo Agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p.173-179. CD-ROM.

MKHABELA, M.S.; MKHABELA, M.S.; MASHININI, N.N. Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.129, p.1-9, 2005.

MORAES, A.V.C.; CAMARGO, M.B.P.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; MASCARENHAS, H.A.A. Teste de modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto, baseados em balanços hídricos climatológicos e de cultura. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 11., 1999, Florianópolis. **Anais...** Epagri, 1999. CD-ROM.

MOREIRA, M.A.; SHIMABUKURO, Y.E. Cálculo do índice de vegetação a partir do sensor AVHRR. In: FERREIRA, N.J. (Ed.) **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 271p.

MORENO, J.F.; MELIÁ, J. A method for accurate geometric correction of NOAA AVHRR HRPT data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n.1, p.204–226, 1993.

MOTTA, J.L.G.; FONTANA, D.C.; WEBER, E. Análise da evolução temporal do NDVI/NOAA em região de soja no Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p.197-204. CD-ROM.

MYERS, V.I.; HEILMAN, M.D.; LYON, R.J.P.; NAMKEN, L.N.; SIMONETT, J.R.; THOMAS, J.R.; WIEGAND, C.L.; WOOLLEY, J.T. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: Remote sensing with spatial reference to agriculture and forestry. **Proceedings...** Washington D.C: National Academy of Sciences, 1970. cap 6, p.253-297.

NASCIMENTO, C. R. **Correção atmosférica de imagens do sensor AVHRR/NOAA utilizando produtos atmosféricos do sensor MODIS/TERRA**. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. 2006.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION'S EARTH OBSERVATORY (NASA/EO). **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**. Disponível em <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.html>. Acesso em 10 jan. 2003.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) **The global vegetation index user's guide**. SDS/NESDIS National Climate Data Center. Washington DC, 1983.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION SATELLITE INFORMATION SYSTEM (NOAASIS) **Satellite Instrument Calibration**. Disponível em <<http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/calibration.html>>. Acesso em 10 mar. 2004.

NINNIS, R.M., EMERY, W.J.; COLLINS, M.J. Automated extraction of pack ice motion from Advanced Very High Resolution Radiometer imagery. **Journal of Geophysical Research**, v.91, p.10725-10734, 1986.

O ESTADO DE SÃO PAULO **Governo lança projeto de previsão de safra por satélite.** Disponível em <<http://www.estadao.com.br/economia/noticias/2004/mai/13/55.htm>>. Acesso em 05 jun. 2004.

PEDRO JÚNIOR, M.J.; CAMARGO, M.B.P.; MIRANDA, M.A.C.; BRUNINI, O. ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R. Teste de modelo agrometeorológico para a estimativa da produtividade da cultura da soja de ciclo precoce. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 3., Campinas, 1983. **Anais...** Campinas: SBA, 1984, p.11-17.

PERGOLA, N.; TRAMUTOLI, V. SANA: sub-pixel automatic navigation of AVHRR imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.12, p.2519-2524, 2000.

PERGOLA, N.; TRAMUTOLI, V. Two years of operational use of subpixel automatic navigation of AVHRR scheme: accuracy assessment and validation. **Remote Sensing of Environment**, v.85, n.2, p.190-203, 2003.

PINO, F.A. Estimação subjetiva de safras agrícolas. **Informações Econômicas**, v.31, n.6, São Paulo, 2001.

PONZONI, F.J.; ZULLO JÚNIOR, J.; LAMPARELLI, R.A.C. In-flight absolute calibration of the CBERS-2 IRMSS sensor data. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.4, p.799-804, 2006.

POTDAR, M.B. Sorghum yield modeling based on crop growth parameters determined from visible and near-IR channel NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.895-905, 1993.

PRICE, J.C. Estimating leaf area index from satellite data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n.3, 727-734, 1993.

QUARMBY, N.A.; TOWNSHEND, J.R.G; SETTLE, J.J.; WHITE, K.H.; MILNES, M.; HINDLE, T.L.; SILLEOS, N. Linear mixture modeling applied to AVHRR data for crop area estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, n.3, p.415-425, 1992.

RAO, C. R. N.; CHEN, J. Post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-14 spacecraft. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p.2743-2747, 1996.

RASMUSSEN, M.S. Assessments of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from AVHRR. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, p.3431-3422, 1992.

REES, W.G. **Physical Principles of Remote Sensing**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990. 247p.

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

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.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, 1973. **Proceedings...** Whashington: NASA, 1974, v.1, p.309-317, 1973.

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

SABINS, F.F. **Remote Sensing: Principles and Interpretation**. New York: W. H. Freeman and Company, 1986. 449p.

SANTOS, A.B. **Evolução diferenciada entre os estados brasileiros do cultivo e do processamento industrial da soja – período de 1970 a 1999**. 98p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2000.

SEILER, R.A.; KOGAN, F.N.; WEI, G. Monitoring weather impact and crop yield from NOAA-AVHRR data in Argentina. **Advanced Space Research**, v.26, n.7, p.1177-1185, 2000.

SELLERS, P. J. Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: J. Wiley, 1989. cap.8, p.297-335.

SENAY, G.B.; ELLIOT, R.L. Capability of AVHRR data in discriminating rangeland cover mixtures. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.2, p.299-312, 2002.

SETTLE, J.J.; DRAKE, N.A. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, n.6, p.1159-1177, 1993.

SOUDANE, K; FRAÇOIS, C; LE MAIRE, G.; LE DANTEC, V.; DUFRÊNE, E. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. **Remote Sensing of Environment**, v.102, p.165-175, 2006.

SUGAWARA, L.M. **Avaliação de modelo agrometeorológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no Estado do Paraná**. São José dos Campos, 181p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

TANRÉ, D.; DEROO, C; DEHAUT, P.; HERMAN, M.; MORRCRETTE, J.J; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P.Y. **Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)**. 1987. 148p.

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

UNGANAI, L.S.; KOGAN, F.N. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v.63, p.219-232, 1998.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS) **Landsat Program**. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/index.php>>. Acesso em 10. jan. 2004.

UNIVERSITY OF ILLINOIS EXTENSION. **Comercial Agriculture**. Disponível em <<http://web.extension.uiuc.edu/state/commag.html>>. Acesso em 10 out. 2006.

VICENTE, J.R.; CASER, D.V.; CAMARGO, A.M.M.P.; OLIVETTI, M.P.A.; PIVA, L.H.O. Comparações entre dados dos censos agropecuários e estimativas das safras agrícolas do Estado de São Paulo. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.37, n.1, p.97-104, 1990.

WIEGAND, G.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2, p.105-119. 1991.

WILSON, E. H.; SADER, S. A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.80, n.3, p.385-396, 2002.

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.

XIN, J.; YU, Z.; VAN LEEUWEN, L.; DRIESSEN, P.M. Mapping crop key phenological stages in the North China Plain using NOAA time series images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.4, p.109-117, 2002.

ZULLO JR. **Correção atmosférica das imagens de satélite e aplicações**. 191p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas. 1994.

7. APÊNDICES

7.1. Apêndice 1 – Script *c-shell* desenvolvido para acionar os módulos do NAV

```
# -----  
#  
# Shell script para executar o georreferenciamento automatico de imagens NOAA  
# por meio da execucao de modulos do software NAV.  
#  
# Utilizar imagens calibradas (2 bytes).  
#  
# Rotinas:  
# - Conversao da imagem HRPT Telonics para o formato CCAR  
# - Correcao de linhas com problemas na imagem  
# - Correcao do cabecalho da imagem  
# - Geracao dos coeficientes de calibracao radiometrica  
# - Calibracao radiometrica das bandas  
# - Navegacao indireta da imagem  
# - Navegacao automatica da imagem pelo metodo da MCC  
# - Navegacao automatica residual da imagem pelo metodo da MCC  
# - Calculo da acuracia, juncao das bandas da imagem e geracao do NDVI via IDL  
#  
# Autoria:  
# João F. G. Antunes - UNICAMP/EMBRAPA (joaof@cnptia.embrapa.br)  
# Júlio C. D. M. Esquerdo - CEPAGRI/UNICAMP (julio@cpa.unicamp.br)  
# -----  
  
#!/bin/csh  
  
set tam = `echo $1 | awk '{print length($0)}'^`  
IF ($#argv == 0 || $tam < 15) THEN  
  echo "  
  echo 'Informe o nome da imagem bruta no formato AAMMDDNIII.i ou'  
  echo 'o nome da imagem 11b no formato AAMMDDNIII.11b, onde:'  
  echo 'AA = ano, DD = dia, MM = mes, de aquisicao da imagem,'  
  echo 'NII = numero do satelite NOAA e l = letra a, b, c,'  
  echo 'referente a sequencia das imagens do dia.'  
  echo 'Exemplos: geo ../030702N16a.i'  
  echo '          geo ../031207N16b.11b'  
  echo "  
  exit  
ENDIF  
  
# Conversao da imagem HRPT Telonics para o formato CCAR  
  
set extensao = `echo $1 | awk '{print substr($0,14,4)}'^`  
echo Extensao: $extensao  
set iment = $1:gr  
set imagem = `echo $iment | awk '{print substr($0,4,14)}'^`  
echo Imagem: $imagem  
set filein = $1  
set fileout = $filein.tmp  
set ano = `echo $imagem | awk '{print substr($0,1,2)}'^`
```

```

set alg1ano = `echo $ano | awk '{print substr($0,1,1)}´
echo Ano: $ano
echo Alg1Ano: $alg1ano

# -----
# Configuracao de variaveis do script
set mascara = 031109N17b_pr_base.msc
set base1 = 031109N17b_pr_base.4
set base2 = 031210N17b_pr_base.4
set base3 = 040228N17i_pr_base.4
set base4 = 040302N17b_pr_base.4
set dir = '/home/noaa/imagens/CONAB/PR/'
set dirpro = '/home/noaa/idl/'
set imsai = "$imagem"_pr
# -----

IF ($extensao =~ '.i') THEN
  echo "
  echo '*** Conversao da imagem HRPT Telonics para o formato CCAR ***'
  echo "
  #doeverything_telonics
  echo doing telonics decoding
  echo filtering with year $ano
  set year = `dectel $filein $fileout`
  IF ($alg1ano != 0) THEN
    echo 'Convertendo a imagem com o ano extraido pelo programa dectel...'
    directfil $filein.fil 22016 0 $year 1 < $fileout
  ELSE
    echo 'Convertendo a imagem com o ano extraido do nome da imagem...'
    directfil $filein.fil 22016 0 $ano 1 < $fileout
  ENDIF
  mv $1.fil $imagem.ccar
  rm $1.tmp
ELSE
  echo "
  echo '*** Conversao da imagem 11b para o formato CCAR ***'
  echo "
  sdsfil15 -f$imagem.ccar -H < $1
ENDIF

# Correcao de linhas com problemas na imagem

echo "
echo '*** Correcao de linhas com problemas na imagem ***'
echo "
processgeneric $imagem.ccar $imagem.ccar.pg
mv $imagem.ccar.pg $imagem.ccar

# Correcao do cabecalho da imagem

echo "
echo '*** Correcao do cabecalho da imagem ***'
echo "
set satellite = `echo $imagem | awk '{print substr($0,8,2)}´
echo Satellite: $satellite
set ano = `echo $imagem | awk '{print substr($0,1,2)}´

```

```

set mes = `echo $imagem | awk '{print substr($0,3,2)}'^
set dia = `echo $imagem | awk '{print substr($0,5,2)}'^
set data = $ano"/"$mes"/"$dia
echo Data: $data
fix_satid $imagem.ccar $satelite
fix_date $imagem.ccar $data

# Geracao dos coeficientes de calibracao radiometrica

echo "
echo '** Geracao dos coeficientes de calibracao radiometrica **'
echo "
calibcomp 1 L $imagem.ccar $NAV/cal
mv COEFFS.$satelite $imagem.coefs

# Calibracao radiometrica das bandas

echo "
echo '** Calibracao radiometrica das bandas **'
echo "
IF ($satelite <= 14) THEN
    echo 'Calibracao para a serie de satelites ate o NOAA-14...'
    rawcal $imagem.coefs 1 0 L $NAV/cal < $imagem.ccar > $imagem.cal
ELSE
    echo 'Calibracao para a serie de satelites do NOAA-15 em diante (KLM)...'
    rawcal15_new $imagem.coefs 1 0 L $NAV/cal < $imagem.ccar > $imagem.cal
ENDIF

# Navegacao indireta da imagem

echo "
echo '** Navegacao indireta da imagem **'
echo "
#Parana
navigate -i$imagem.cal -f$imsai -c12345 -I88 -I512 -m750 -t-24.516 -g-51.3 -r5 -pe -v -B -Y -Z
mv $imsai.ELEV $imsai.elev
mv $imsai.SZA $imsai.sza
rm $imsai.AZIM
rm $imsai.SAZA

rm $imagem.ccar
rm $imagem.coefs

# Navegacao automatica da imagem pelo metodo da MCC

echo "
echo '** Navegacao automatica da imagem pelo metodo da MCC **'
echo "

echo 'Executando a MCC com a base 1...'
echo "
run_auto_yaw $imsai.4 $imagem.cal $base1 "$imsai"_vet_base1 $imsai.elev $mascara
set num_vet_base1 = `wc -l "$imsai"_vet_base1.fil | awk '{print $1}`
echo Numero de vetores encontrados pela base 1: $num_vet_base1
set base = $base1

```

```

IF (! -e $Simsai.4_att.2) THEN
  echo "
  echo 'Executando a MCC com a base 2 ...'
  echo "
  run_auto_yaw $Simsai.4 $Imagem.cal $base2 "$Simsai"_vet_base2 $Simsai.elev $mascara
  set num_vet_base2 = `wc -l "$Simsai"_vet_base2.fil | awk '{print $1}`
  echo Numero de vetores encontrados pela base 2: $num_vet_base2
  set base = $base2
ENDIF
IF (! -e $Simsai.4_att.2) THEN
  echo "
  echo 'Executando a MCC com a base 3...!'
  echo "
  run_auto_yaw $Simsai.4 $Imagem.cal $base3 "$Simsai"_vet_base3 $Simsai.elev $mascara
  set num_vet_base3 = `wc -l "$Simsai"_vet_base3.fil | awk '{print $1}`
  echo Numero de vetores encontrados pela base 3: $num_vet_base3
  set base = $base3
ENDIF
IF (! -e $Simsai.4_att.2) THEN
  echo "
  echo 'Executando a MCC com a base 4...!'
  echo "
  run_auto_yaw $Simsai.4 $Imagem.cal $base4 "$Simsai"_vet_base4 $Simsai.elev $mascara
  set num_vet_base4 = `wc -l "$Simsai"_vet_base4.fil | awk '{print $1}`
  echo Numero de vetores encontrados pela base 4: $num_vet_base4
  set base = $base4
ENDIF

IF (-e $Simsai.4_att.2) THEN
  mv $Simsai.4_att.1 "$Simsai"_att.1
  mv $Simsai.4_att.2 "$Simsai"_att.2
  mv $Simsai.4_att.3 "$Simsai"_att.3
  mv $Simsai.4_att.4 "$Simsai"_att.4
  mv $Simsai.4_att.5 "$Simsai"_att.5
  mv $Simsai.4_att.ELEV "$Simsai"_att.elev
  rm $Simsai.4_att.AZIM

  rm $Simsai.1
  rm $Simsai.2
  rm $Simsai.3
  rm $Simsai.4
  rm $Simsai.5

  mv temp.attfile $Simsai.attfile #arquivo attfile

  rm attitudes_file      #arquivo de valores attitude
  rm attitudes_file.4.*  #arquivo de valores attitude
  rm avgvals_temp.4.*   #arquivo com a media dos valores attitude
  rm temp_att.data      #arquivo attitude.data
  rm temp.attfile.4     #arquivo attfile
  rm temp_disp
  rm temp_disp_merged
  rm temp_disp_small

  echo "
  echo 'Fazendo a navegacao automatica residual da imagem pela MCC.'

```

```

echo 'Gerando a imagem final...'
echo "
autonudgemot $base $mascara "$Simsai"_att.4 mp.seed
mv "$Simsai"_att.4.nud $Simsai.4
mv "$Simsai"_att.4.vec "$Simsai"_vet
mv "$Simsai"_att.4.vec.fil "$Simsai"_vet.fil

autonudge_new "$Simsai"_att.1 "$Simsai"_vet.fil $mascara $Simsai.1
autonudge_new "$Simsai"_att.2 "$Simsai"_vet.fil $mascara $Simsai.2
autonudge_new "$Simsai"_att.3 "$Simsai"_vet.fil $mascara $Simsai.3
autonudge_new "$Simsai"_att.5 "$Simsai"_vet.fil $mascara $Simsai.5

rm mp.seed.tmp
rm filt.tmp

rm "$Simsai"_att.1
rm "$Simsai"_att.2
rm "$Simsai"_att.3
rm "$Simsai"_att.4
rm "$Simsai"_att.5

rm "$Simsai"_att.elev

rm $Simsai.attfile

rm "$Simsai"_vet
ELSE
  IF ($num_vet_base1 >= $num_vet_base2 && $num_vet_base1 >= $num_vet_base3 && $num_vet_base1 >=
$num_vet_base4) THEN
    mv "$Simsai"_vet_base1.fil "$Simsai"_vet.fil
    set limvet = $num_vet_base1
    #echo LIMVET $limvet
    echo 'Usando vetores da base de novembro de 2003...'
  ENDIF

  IF ($num_vet_base2 >= $num_vet_base3 && $num_vet_base2 >= $num_vet_base4 && $num_vet_base2 >=
$num_vet_base1) THEN
    mv "$Simsai"_vet_base2.fil "$Simsai"_vet.fil
    set limvet = $num_vet_base2
    #echo LIMVET $limvet
    echo 'Usando vetores da base de dezembro de 2003...'
  ENDIF

  IF ($num_vet_base3 >= $num_vet_base4 && $num_vet_base3 >= $num_vet_base1 && $num_vet_base3 >=
$num_vet_base2) THEN
    mv "$Simsai"_vet_base3.fil "$Simsai"_vet.fil
    set limvet = $num_vet_base3
    #echo LIMVET $limvet
    echo 'Usando vetores da base de fevereiro de 2004...'
  ENDIF

  IF ($num_vet_base4 >= $num_vet_base1 && $num_vet_base4 >= $num_vet_base2 && $num_vet_base4 >=
$num_vet_base3) THEN
    mv "$Simsai"_vet_base4.fil "$Simsai"_vet.fil
    set limvet = $num_vet_base4
    #echo LIMVET $limvet

```

```

    echo 'Usando vetores da base de marco de 2004...'
ENDIF

IF ($limvet >= 4) THEN
    echo "
    echo 'Executando o autonudge com o maior numero de vetores encontrado pelas bases.'
    echo 'Gerando a imagem *_nud...!'
    echo "
    autonudge_new $simsai.1 "$simsai"_vet.fil $mascara "$simsai"_nud.1
    autonudge_new $simsai.2 "$simsai"_vet.fil $mascara "$simsai"_nud.2
    autonudge_new $simsai.3 "$simsai"_vet.fil $mascara "$simsai"_nud.3
    autonudge_new $simsai.4 "$simsai"_vet.fil $mascara "$simsai"_nud.4
    autonudge_new $simsai.5 "$simsai"_vet.fil $mascara "$simsai"_nud.5

    mv $simsai.elev "$simsai"_nud.elev
    mv $simsai.sza "$simsai"_nud.sza

    rm $simsai.1
    rm $simsai.2
    rm $simsai.3
    rm $simsai.4
    rm $simsai.5
ELSE
    echo "
    echo 'A MCC nao encontrou o numero minimo de vetores para execucao do autonudge.'
    echo 'Gerando a imagem *_fal...!'
    echo "
    mv $simsai.1 "$simsai"_fal.1
    mv $simsai.2 "$simsai"_fal.2
    mv $simsai.3 "$simsai"_fal.3
    mv $simsai.4 "$simsai"_fal.4
    mv $simsai.5 "$simsai"_fal.5

    mv $simsai.elev "$simsai"_fal.elev
    mv $simsai.sza "$simsai"_fal.sza
ENDIF
ENDIF

rm filt.in.nav
rm mp.tmp          #copia do arquivo mp.seed
rm "$simsai"_vet_*
rm $imagem.cal

# Calculo da acuracia, juncao das bandas da imagem e geracao do NDVI via IDL

echo "
echo '*** Calculo da acuracia, juncao das bandas da imagem e geracao do NDVI via IDL ***'
echo "

set arqpro = $simsai.pro
echo Arquivo IDL: $arqpro
IF (-e $arqpro) THEN
    rm $arqpro
ENDIF

IF (-e $simsai.2) THEN

```

```

    set imfinal = $imsai.2
ENDIF

IF (-e "$imsai"_nud.2) THEN
    set imfinal = "$imsai"_nud.2
ENDIF

IF (-e "$imsai"_fal.2) THEN
    set imfinal = "$imsai"_fal.2

    echo .run mod_nav_lx.pro > $arqpro
    echo N, \"$dir\", \"$imfinal\", \"$dirpro\" >> $arqpro

    echo exit >> $arqpro
ELSE
    echo .run calcedsl.pro > $arqpro
    echo D, \"$dir\", \"$imsai"_vet.fil\" >> $arqpro

    echo .run mod_nav_lx.pro >> $arqpro
    echo N, \"$dir\", \"$imfinal\", \"$dirpro\" >> $arqpro

    echo exit >> $arqpro
ENDIF

idl $arqpro
rm $arqpro

rm "$imsai"_vet.fil

IF (-e $imsai.2) THEN
    rm $imsai.elev
    rm $imsai.sza

    rm $imsai.1
    rm $imsai.2
    rm $imsai.3
    rm $imsai.4
    rm $imsai.5

    mv "$imsai"_vet.des $imsai.des
ENDIF

IF (-e "$imsai"_nud.2) THEN
    rm "$imsai"_nud.elev
    rm "$imsai"_nud.sza

    rm "$imsai"_nud.1
    rm "$imsai"_nud.2
    rm "$imsai"_nud.3
    rm "$imsai"_nud.4
    rm "$imsai"_nud.5

    mv "$imsai"_vet.des "$imsai"_nud.des
ENDIF

IF (-e "$imsai"_fal.2) THEN

```

```
rm "$simsai"_fal.elev
rm "$simsai"_fal.sza

rm "$simsai"_fal.1
rm "$simsai"_fal.2
rm "$simsai"_fal.3
rm "$simsai"_fal.4
rm "$simsai"_fal.5
ENDIF

echo
echo '*** PROCESSO FINALIZADO ***'
echo
```

7.2. Apêndice 2 – Rotina IDL principal para geração dos produtos (mod_nav)

```
; NOME: mod_nav
;
; FINALIDADE: rotina principal para a leitura das imagens geradas pelo NAV e geração de produtos.
; Faz a chamada dos módulos:
;   mod_cab - leitura do cabeçalho das imagens NAV
;   mod_cal - leitura das bandas calibradas geradas pelo NAV
;   mod_nc - leitura das bandas em nível de cinza geradas pelo NAV
;   mod_ndvi - geração das imagens NDVI
;   mod_fig - geração de imagens no formato JPEG
;   mod_nuvem - geração de máscara de nuvens
;
; ENTRADA: bandas em nível de cinza ou calibradas pelo pacote NAV (*.1, *.2, *.3, *.4, *.5)
; arquivo dos ângulos de elevação do sensor (*.elev)
; arquivo com ângulo zenital solar (*.sza)
;
; SAÍDA:
; - nome_imagem_*****.nav", onde "*" são as bandas presentes: Ex. Imagem_1234567.nav possui os 5
;   canais + ângulo zenital solar + ângulo de varredura. Para imagens não calibradas, o arquivo de saída
;   apresenta valores em NC (8 bits). Para imagens calibradas, o arquivo de saída apresenta valores
;   inteiros multiplicados por 10, como é mostrado a seguir:
;
;   Banda 1 = reflectância aparente (x 10)
;   Banda 2 = reflectância aparente (x 10)
;   Banda 3A = reflectância aparente (x 10) * Somente NOAA-17 *
;   Banda 3B = temperatura de brilho - K (x 10)
;   Banda 4 = temperatura de brilho - K (x 10)
;   Banda 5 = temperatura de brilho - K (x 10)
;   Banda 6 = ângulo zenital solar - (graus decimais x 10)
;   Banda 7 = ângulo de varredura do sensor (graus decimais x 10)
;
; - nome_imagem.prd (opcional). Arquivo contendo duas bandas:
;   Banda 1: máscara de nuvens (verificar mod_nuvem para alterar critérios de detecção).
;   Banda 2: NDVI com valores flutuantes entre -1 e +1, ou escalonados em 256 NC. Apresenta
;   opção de aplicar o mascaramento de nuvens na imagem NDVI.
;
; - nome_imagem.jpeg (formato JPEG opcional). Ver opções da figura no corpo do programa.
;
; OBSERVAÇÕES: primeira linha das imagens deve ser descartada para análise (cabeçalho).
; configurar parâmetros de execução no corpo do programa.
;
; ÚLTIMA DATA DE ATUALIZAÇÃO:
; 15/12/2004

PRO N, DIR, ARQ_IM, DIR_IDL
compile_opt STRICTARR
!quiet=1

; Checagem de cálculos matemáticos inválidos
!EXCEPT=0

; OPERANDO EM BATCH MODE
envi, /restore_base_save_files
envi_batch_init
```

```

:
; CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS

; Opções: SIM=1 NÃO=0
c_sza=1      ;Adiciona Canal 6 (ângulo zenital solar)
c_scan=1     ;Adiciona Canal 7 (ângulo de varredura)
cor_SZA=0    ;Correção radiométrica pelo cosseno do ângulo zenital solar (Banda 6 necessária)
prods=1      ;Gera arquivo de produtos (*.prd)
nuvem=1      ;Aplicar mascaramento de nuvens no NDVI
m_scan=1     ;Mascarar ângulo de varredura excessivo no NDVI
ang_sc=42    ;Entre com o ângulo de varredura máximo aceitável no NDVI
m_sza=1      ;Mascarar ângulo zenital inapto?
ang_sz=70    ;Entre com o ângulo zenital solar máximo aceitável
esc=0        ;Escalonamento do NDVI em 256 NC (entre -1 e +1)
figuras=1    ;Gerar figuras em formato JPEG (alterar títulos da figura no corpo do programa)

;Vetor com malha política para sobreposição à imagem JPEG
vetor=DIR_IDL+'vetor_pr.img'
nor=DIR_IDL+'norte.img'
:

print, 'DIR: ', DIR
print, 'Imagem: ', ARQ_IM
ARQ = DIR + ARQ_IM
print, 'ARQ: ', ARQ

;-----Extraindo nome do arquivo-----

c_dir = STRLEN(DIR)
nome = STRMID(arq, 0,STRPOS(arq, "."/reverse_search))
nome = STRMID(nome, c_dir, STRPOS(arq, "."/reverse_search))

;-----Encontrando as bandas presentes-----

Arq_b1 = FINDFILE(DIR+nome+'.1', count=c1)
Arq_b2 = FINDFILE(DIR+nome+'.2', count=c2)
Arq_b3 = FINDFILE(DIR+nome+'.3', count=c3)
Arq_b4 = FINDFILE(DIR+nome+'.4', count=c4)
Arq_b5 = FINDFILE(DIR+nome+'.5', count=c5)
Arq_sza = FINDFILE(DIR+nome+'.sza', count=c6)
Arq_scan = FINDFILE(DIR+nome+'.elev', count=c7)

nb=c1+c2+c3+c4+c5+c6+c7; número de bandas
nb=STRCOMPRESS(STRTRIM(nb,2))
print, "
print,'Nome do Arquivo: ', nome
print, 'Banda(s) Encontrada(s): ', nb

;-----Chamando Módulo de Leitura do Cabeçalho (mod_cab)-----

mod_cab=mod_cab(arq, taos, sat, nc, nl, ULlt, ULln, URlt, URln, LLlt, LLln, LRlt, LRln, pix_lon, pix_lat)

;-----Verificando se as imagens de entrada são calibradas-----

ON_IOERROR, Erro
cal=1

```

```

OPENR,lun, arq, /GET_lun
teste = make_array(nc, nl,/integer)
READU, lun, teste
GOTO, Ok
Erro:cal=0
Ok: FREE_LUN, lun

;-----Chamando Módulo de Leitura de Imagens Calibradas (mod_cal)-----

IF keyword_set(cal) THEN BEGIN
  mod_cal=mod_cal (Arq_b1=arq_b1,Arq_b2=arq_b2, Arq_b3=arq_b3, Arq_b4=arq_b4, Arq_b5=arq_b5, $
    arq_sza=arq_sza, arq_scan=arq_scan, nc, nl, c1=c1, c2=c2, c3=c3, c4=c4, c5=c5, c6=c6, c7=c7, $
    cor_sza=cor_sza, banda1=banda1, banda2=banda2, banda3=banda3, banda4=banda4, banda5=banda5, $
    sza=sza, scan=scan, c_sza=c_sza, c_scan=c_scan,arq, imagem, bnam)
  print, '...Processando Bandas Calibradas'
ENDIF

;-----Chamando Módulo de Leitura de Imagens em Nível de Cinza (mod_nc)-----

IF not keyword_set(cal) THEN BEGIN
  mod_nc=mod_nc (Arq_b1=arq_b1,Arq_b2=arq_b2, Arq_b3=arq_b3, Arq_b4=arq_b4, Arq_b5=arq_b5, $
    arq_sza=arq_sza, arq_scan=arq_scan, nc, nl, c1=c1, c2=c2, c3=c3, c4=c4, c5=c5, c6=c6, c7=c7, $
    cor_sza=cor_sza, banda1=banda1, banda2=banda2, banda3=banda3, banda4=banda4, banda5=banda5, $
    sza=sza, scan=scan, c_sza=c_sza, c_scan=c_scan, arq, imagem, bnam)
  print, '...Processando Bandas Não Calibradas'
ENDIF

;-----Nomeando a imagem de saída e salvando em disco-----

ARQ = strjoin(arq,")
Nome_im = DIR+nome+'_'+arq+'.nav'
openw, unit, nome_im, /get_lun
writeu, unit, Imagem
free_lun, unit

;-----Construindo cabeçalho do ENVI-----

PS = [pix_lon, pix_lat]
MC = [0.5,0.5, ULln,ULlt]
DATUM = 'WGS-84'
MAP_INFO = envi_map_info_create(/geographic, DATUM=datum, mc=mc, ps=ps)
descrip=[sat, taos]
im_hdr = DIR+nome+'_'+arq
descrip=[sat, taos]

IF keyword_set(cal) THEN data_type=2 ELSE data_type=1
IF keyword_set(c6) and not keyword_set(c_sza) THEN nb=nb-1
IF keyword_set(c7) and not keyword_set(c_scan) THEN nb=nb-1

ENVI_SETUP_HEAD, fname=im_hdr, xstart=0, ystart=0, ns=nc, nl=nl, nb=nb, bnames=bnam, $
  map_info=map_info, interleave=0, data_type=data_type, offset=0, file_type=0, descrip=descrip, $
  byte_order=0, /write

;-----Gerando Produtos-----

IF keyword_set(prods) THEN BEGIN

```

;------Chamando Módulo de Geração de mascaramento de nuvens-----

```
IF keyword_set(banda1) and keyword_set(banda2) and keyword_set(banda4) and keyword_set(banda5) $
THEN BEGIN
    nuv=mod_nuvem(nc=nc, nl=nl, banda1=banda1, banda2=banda2, banda4=banda4, banda5=banda5)
    marcador_1=1
ENDIF
```

;------Chamando Módulo de Geração do NDVI (mod_ndvi)-----

```
IF keyword_set(banda1) and keyword_set(banda2) THEN BEGIN
    ndvi=mod_ndvi(banda1=banda1, banda2=banda2, sza=sza, scan=scan, ang_sz=ang_sz,$
    ang_sc=ang_sc, esc=esc, m_sza=m_sza, m_scan=m_scan)
    IF keyword_set(esc) THEN data_type=1 ELSE data_type=4
    marcador_2=1
    IF keyword_set(nuv) THEN BEGIN
        index=where(nuv eq 0, count)
        IF count ne 0 THEN ndvi[index] = -1.1
    ENDIF
ENDIF
```

; ----Montando a matriz de produtos-----

```
IF keyword_set(marcador_1) and keyword_set(marcador_2) THEN BEGIN
    produtos=fltarr(nc, nl, 2)
    IF keyword_set(esc) THEN produtos=bytarr(nc, nl, 2)
    produtos[:,*,0]=nuv
    produtos[:,*,1]=ndvi
    bnames=['Nuvem (0) / Sem Nuvem (1)', 'NDVI']
    arq_prd = DIR+nome+'.prd'
    openw, unit, arq_prd, /get_lun
    writeu, unit, produtos
    free_lun, unit
    im_hdr = DIR+nome

    ENVI_SETUP_HEAD, fname=im_hdr, xstart=0, ystart=0, ns=nc, nl=nl, nb=2, bnames=bnames, $
    map_info=map_info, interleave=0, data_type=data_type, offset=0, byte_order=0, /write
    ENDIF ELSE marcador_3=1
ENDIF
```

;------Chamando Módulo de Geração de Figuras JPEG (mod_jpeg)-----

; Características da Figura:

```
; Vetor           ; nome do arquivo contendo o vetor a ser sobreposto
; Título         ; título da figura
; sub1 e sub2    ; informações cartográficas e fonte
; texto_sub     ; tamanho da fonte das informações de sub1 e sub2
; color_table   ; paleta de cores
; texto_grid    ; tamanho da fonte do grid (latitude e longitudes)
; texto titulo  ; tamanho da fonte do título
; legenda       ; título da legenda. Omitir se desejar sem legenda
; nor           ; nome do arquivo da figura do "Norte". Omitir se desejar sem
; esp          ; espaçamento entre latitude e longitudes. Padrão = 2 graus
; Glinestyle    ; estilo da linha utilizada no grid. Padrão = pontilhada
; percent       ; Porcentagem para eliminação da saturação no contraste da imagem
```

```

IF keyword_set(figuras) THEN BEGIN

    sub1=['PROJEÇÃO CILÍNDRICA EQUÍDISTANTE - LAT/LONG (WGS-84)']
    sub2=['ESCALA 1:3.000.000 FONTE: CEPAGRI/UNICAMP']

    ;NDVI

    IF not keyword_set(marcador_3) and not keyword_set(esc) THEN BEGIN
        envi_open_file, arq_prd, r_fid=fid
        titulo='NDVI '+sat+ ' - '+ taos+ ' (GMT)'
        ndvi1=produtos[*,*,1]
        ndvi2=produtos[*,*,1]
        ndvi3=produtos[*,*,1]
        jpeg=mod_fig(vetor, nc, nl, fid=fid,ULln, ULlt, LRln, LRlt, r1=ndvi1, g1=ndvi2, b1=ndvi3, arq=arq, $
            percent=2,titulo, sub1, sub2, texto_sub=0.6,dir, color_table=13, legenda='NDVI',nome, $
            nome_jpeg='_ndvi',texto_grid=0.6, texto_titulo=0.7,im_jpg, nor, esp=2, GLINESTYLE=2)
        envi_file_mng, id=fid, /remove
        jpg_ndvi=im_jpg
    ENDIF

    ;RGB-321

    IF keyword_set(banda1) and keyword_set(banda2) and keyword_set(banda3) THEN BEGIN
        envi_open_file, Nome_im, r_fid=fid
        titulo='COMPOSIÇÃO RGB1-121 '+sat+ ' - '+ taos+ ' (GMT)'
        ban1=banda3
        ban2=banda2
        ban3=banda1
        jpeg=mod_fig(vetor, nc, nl, fid=fid,ULln, ULlt, LRln, LRlt, r1=ban1, g1=ban2, b1=ban3, arq=arq, $
            percent=2,titulo, sub1, sub2, texto_sub=0.6,dir, color_table=0, nome, nome_jpeg='_rgb121', $
            texto_grid=0.6, texto_titulo=0.7,im_jpg, nor, esp=2, GLINESTYLE=2)
        envi_file_mng, id=fid, /remove
        jpg_rgb=im_jpg
    ENDIF
ENDIF

;-----Imprimindo avisos finais-----

print, "
print, 'AVISOS:'
print, "
print, '- Arquivo(s) gerado(s):

IF keyword_set(nome_im) THEN print, nome_im
IF keyword_set(marcador_1) and keyword_set(marcador_2) THEN print, arq_prd
IF keyword_set(jpg_ndvi) THEN print, jpg_ndvi
IF keyword_set(jpg_RGB) THEN print, jpg_RGB

print, "
IF keyword_set(cor_SZA) and not keyword_set(c6) THEN print, "- Banda 6 ausente. Correção", $
+" pelo ângulo zenital solar não realizada."

IF keyword_set(marcador_3) THEN BEGIN
    print, '- Geração de produtos não realizada. Ausência de bandas necessárias (1, 2, 4 ou 5).'
ENDIF

```

```
IF keyword_set(ndvi) THEN BEGIN
  IF keyword_set(m_sza) and not keyword_set(sza) THEN print, '- Banda 6 ausente. Mascaramento de', $
  +' ângulos zenitais inaptos do NDVI não realizado.'

  IF keyword_set(m_scan) and not keyword_set(scan) THEN print, '- Mascaramento "OFF-NADIR"', $
  +' do NDVI não realizado. Ausência da Banda 7 (ângulo de varredura).'
ENDIF

END
```

7.3. Apêndice 3 – Rotina IDL para leitura do cabeçalho das imagens (mod_cab)

```
; NOME: mod_cab
;
; FINALIDADE: extrai as informações contidas no cabeçalho das imagens geradas pelo NAV.
;
; ENTRADA: bandas geradas pelo NAV.
;
; SAÍDA: informações contidas no cabeçalho da imagem.
;
; ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO:
; 01/09/2005

FUNCTION mod_cab, arq, taos, sat, nc, nl, ULlt, ULln, URlt, URln, LLlt, LLln, LRlt, LRln, pix_lon, pix_lat

OPENR, cab, arq,/GET_LUN
Header=string(cab,format='(A290)')
READU, cab, Header
FREE_LUN, cab

ip=strpos(header,'x')
IF ip GE 0 THEN nc=fix(strmid(header,ip+1))
ip=strpos(header,'y')
IF ip GE 0 THEN nl=fix(strmid(header,ip+1))
ip=strpos(header,'ULlt')
IF ip GE 0 THEN ULlt=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'ULln')
IF ip GE 0 THEN ULln=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'URlt')
IF ip GE 0 THEN URlt=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'URln')
IF ip GE 0 THEN URln=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'LRlt')
IF ip GE 0 THEN LRlt=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'LRln')
IF ip GE 0 THEN LRln=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'LLlt')
IF ip GE 0 THEN LLlt=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'LLln')
IF ip GE 0 THEN LLln=float(strmid(header,ip+4))
ip=strpos(header,'taos')
IF ip GE 0 THEN taos=string(strmid(header,ip+4,17))
ip=strpos(header,'NOAA')
IF ip GE 0 THEN sat=string(strmid(header,ip,8))

nc=strcompress(strtrim(nc,2))
nl=strcompress(strtrim(nl,2))
ULlt=strcompress(strtrim(ULlt,2))
ULln=strcompress(strtrim(ULln,2))
URlt=strcompress(strtrim(URlt,2))
URln=strcompress(strtrim(URln,2))
LRlt=strcompress(strtrim(LRlt,2))
LRln=strcompress(strtrim(LRln,2))
LLlt=strcompress(strtrim(LLlt,2))
LLln=strcompress(strtrim(LLln,2))
```

```

sat=strcompress(strtrim(sat,2))

;-----Cálculo do Tamanho do Pixel-----

pix_lat=(float(ULIt)-float(LLIt))/(nl-1)
pix_lon=(float(URIn)-float(ULIn))/(nc-1)

;-----Imprimindo informações do cabeçalho-----

print, '-----'
print,'Data e Hora da Passagem (GMT): ',taos
print,'Satélite: ', sat
print,'No. Colunas: ', nc
print,'No. Linhas: ', nl
print, "
print,'Coordenadas Superiores: ULIt: ', ULIt,' ULIn: ', ULIn,' URIt: ', URIt,' URIn: ', URIn
print,'Coordenadas Inferiores: LLIt: ', LLIt,' LLIn: ', LLIn,' LRIt: ', LRIt,' LRIn: ', LRIn
print, "
print,'Tamanho do pixel em X: ', pix_lon, ' graus'
print,'Tamanho do pixel em Y: ', pix_lat, ' graus'
print,'-----'

return, taos
return, sat
return, nc
return, nl
return, ULIt
return, ULIn
return, URIt
return, URIn
return, LLIt
return, LLIn
return, LRIt
return, LRIn
return, pix_lon
return, pix_lat

```

END

7.4. Apêndice 4 – Rotina IDL para leitura dos dados calibrados (mod_cal)

```
; NOME: mod_cal
;
; FINALIDADE: leitura das bandas calibradas.
;
; ENTRADA: bandas geradas pelo NAV.
;
; SAÍDA: matriz com os dados calibrados:
;   Banda 1 = Reflectância Aparente - % (x 10)
;   Banda 2 = Reflectância Aparente - % (x 10)
;   Banda 3A = Reflectância Aparente - % (x 10) * Somente NOAA-17 * ou
;   Banda 3B = Temperatura de Brilho - K (x 10) ou Celsius
;   Banda 4 = Temperatura de Brilho - K (x 10) ou Celsius
;   Banda 5 = Temperatura de Brilho - K (x 10) ou Celsius
;   Banda 6 = Ângulo Zenital Solar - Graus Decimais (x 10)
;   Banda 7 = Ângulo de Varredura do Sensor - Graus Decimais (x 10)
;
; OPÇÃO: normalização dos dados pelo cosseno do ângulo zenital solar.
;
; ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO:
;   01/09/2005

FUNCTION mod_cal, Arq_b1=arq_b1, Arq_b2=arq_b2, Arq_b3=arq_b3, Arq_b4=arq_b4, $
  Arq_b5=arq_b5, arq_sza=arq_sza, arq_scan=arq_scan, nc, nl, c1=c1, c2=c2, c3=c3, $
  c4=c4, c5=c5, c6=c6, c7=c7, cor_sza=cor_sza, banda1=banda1, banda2=banda2, banda3=banda3, $
  banda4=banda4, banda5=banda5, sza=sza, scan=scan, arq, imagem, bnam, $
  c_sza=c_sza, c_scan=c_scan

;-----Carregando Ângulo Zenital Solar-----

IF keyword_set(c6) THEN BEGIN
  OPENR, lun, arq_sza, /GET_lun
  SZA = intarr(nc, nl)
  READU, lun, SZA
  Byteorder, SZA, /NTOHS
  SZA=float(SZA)
  SZA=SZA/10
  FREE_LUN, lun
ENDIF

;-----Carregando Banda 1-----

IF keyword_set(c1) THEN BEGIN
  OPENR, lun, Arq_b1, /GET_lun
  B1 = intarr(nc, nl)
  READU, lun, B1
  Byteorder, B1, /NTOHS
  Banda1=b1
  M1 = MEDIAN(Banda1)
  IF keyword_set(cor_SZA) and keyword_set(c6) THEN BEGIN
    Banda1=Banda1/cos(!PI/180)*SZA
  ENDIF
  FREE_LUN, lun
ENDIF
```

```

;-----Carregando Banda 2-----
IF keyword_set(c2) THEN BEGIN
  OPENR,lun, Arq_b2, /GET_lun
  B2 = intarr(nc, nl)
  READU, lun, B2
  Byteorder,B2, /NTOHS
  Banda2=b2
  M2 = MEDIAN(Banda2)
  IF keyword_set(cor_SZA) and keyword_set(c6) THEN BEGIN
    Banda2=Banda2/cos(!PI/180)*SZA)
  ENDIF
  FREE_LUN, lun
ENDIF

;-----Carregando Banda 3-----
IF keyword_set(c3) THEN BEGIN
  OPENR,lun, Arq_b3, /GET_lun
  B3 = intarr(nc, nl)
  READU, lun, B3
  Byteorder,B3, /NTOHS
  Banda3=b3
  M3 = MEDIAN(Banda3)
  IF keyword_set(cor_SZA) and keyword_set(c6) THEN BEGIN
    Banda3=Banda3/cos(!PI/180)*SZA)
  ENDIF
  FREE_LUN, lun
ENDIF

;-----Carregando Banda 4-----
IF keyword_set(c4) THEN BEGIN
  OPENR,lun, Arq_b4, /GET_lun
  B4 = intarr(nc, nl)
  READU, lun, B4
  Byteorder,B4, /NTOHS
  Banda4=b4
  M4 = MEDIAN(Banda4)
  IF keyword_set(cor_SZA) and keyword_set(c6) THEN BEGIN
    Banda4=Banda4/cos(!PI/180)*SZA)
  ENDIF
  FREE_LUN, lun
ENDIF

;-----Carregando Banda 5-----
IF keyword_set(c5) THEN BEGIN
  OPENR,lun, Arq_b5, /GET_lun
  B5 = intarr(nc, nl)
  READU, lun, B5
  Byteorder,B5, /NTOHS
  Banda5=b5
  M5 = MEDIAN(Banda5)
  IF keyword_set(cor_SZA) and keyword_set(c6) THEN BEGIN
    Banda5=Banda5/cos(!PI/180)*SZA)

```

```
ENDIF
FREE_LUN, lun
ENDIF
```

;------Carregando Ângulo de Elevação e transformando em Ângulo de Varredura-----

```
IF keyword_set(c7) THEN BEGIN
OPENR,lun, Arq_scan, /GET_lun
SCAN = intarr(nc, nl)
READU, lun, SCAN
Byteorder,SCAN, /NTOHS
SCAN=float(SCAN)
SCAN=(!PI/180)*SCAN/10
SCAN=asin(cos(SCAN)/1.13)
SCAN=(SCAN*(180/!PI))*10
FREE_LUN, lun
ENDIF
```

```
IF keyword_set(c6) THEN SZA=SZA*10
```

;------Construindo a imagem e nomeando as Bandas-----

```
Imagem = intarr(nc,nl,7)
Good = intarr(7)
BNAM = strarr(7)
ARQ=strarr(7)
```

```
IF keyword_set(c1) THEN BEGIN
Imagem[*,*,0] = banda1
BNAM[0] = ['Banda 1 - Reflec. Aparente - % (x 10)']
ARQ[0]='1'
Good[0] = 1
ENDIF
```

```
IF keyword_set(c2) THEN BEGIN
Imagem[*,*,1] = banda2
BNAM[1] = ['Banda 2 - Reflec. Aparente - % (x 10)']
ARQ[1]='2'
Good[1] = 1
ENDIF
```

```
IF keyword_set(c3) THEN BEGIN
Imagem[*,*,2] = banda3
IF M3 GT 2000 THEN BEGIN
BNAM[2] = ['Banda 3 - Temp. de Brilho - K (x 10)']
ENDIF ELSE BEGIN
BNAM[2] = ['Banda 3 - Reflec. Aparente - % (x 10)']
ENDELSE
ARQ[2]='3'
Good[2] =
ENDIF
```

```
IF keyword_set(c4) THEN BEGIN
Imagem[*,*,3] = banda4
BNAM[3] = ['Banda 4 - Temp. de Brilho - K (x 10)']
ARQ[3]='4'
Good[3] = 1
```

```

ENDIF

IF keyword_set(c5) THEN BEGIN
  Imagem[*,*,4] = banda5
  BNAM[4] = ['Banda 5 - Temp. de Brilho - K (x 10)']
  ARQ[4]='5'
  Good[4] = 1
ENDIF

IF keyword_set(c6) and keyword_set(c_sza) THEN BEGIN
  Imagem[*,*,5] = SZA
  BNAM[5] = ['Ângulo Zenital Solar - Graus (x 10)']
  ARQ[5]='6'
  Good[5] = 1
ENDIF

IF keyword_set(c7) and keyword_set(c_scan) THEN BEGIN
  Imagem[*,*,6] = SCAN
  BNAM[6] = ['Ângulo Varredura Sensor - Graus (x 10)']
  ARQ[6]='7'
  Good[6] = 1
ENDIF

bandas_existentes = Where(Good GT 0, count)
IF count GT 0 THEN BEGIN
  Imagem = Imagem[*,*,bandas_existentes] ;Monta a imagem com as bandas existentes
  BNAM = BNAM[bandas_existentes] ;Monta a matriz com o nome das bandas existentes
  ARQ = ARQ[bandas_existentes] ;Monta o nome do arquivo com as bandas existentes
ENDIF

return, imagem
return, arq
return, bnam

END

```

7.5. Apêndice 5 – Rotina IDL para geração da máscara de nuvens (mod_nuv)

```
; NOME: mod_nuven
;
; FINALIDADE: verifica a presença de nuvens e gera imagem binária (nuvem=0, sem nuvem=1).
;
; ENTRADA: bandas 1, 4 e 5 calibradas.
;
; SAÍDA: máscara de nuvens.
;
; CRITÉRIOS DE DETECÇÃO:
;
; 1o. Critério: Banda 1 > 15%
; 2o. Critério:  $0.8 < \text{ratio} < 1.6$ , onde  $\text{ratio} = \text{banda2}/\text{banda1}$ 
;           Banda 4 < 290K
; 3o. Critério: Banda 5 < 280K
;
; ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO:
; 01/09/2005

FUNCTION mod_nuven, nc=nc, nl=nl, banda1=banda1, banda2=banda2, banda4=banda4, banda5=banda5

; Transformando para flutuante e dividindo por 10
b1=float(banda1)/10
b2=float(banda2)/10
b4=float(banda4)/10
b5=float(banda5)/10

; 1o. Critério - Valor da Banda 1

nuv1=make_array(nc,nl,/byte,value=1)
v_b1=15
index=where(b1 gt v_b1, count)
IF count ne 0 THEN nuv1[index] = 0

; 2o. Critério - Banda2/Banda1 e Banda4

nuv2=make_array(nc,nl,/byte,value=1)
mi=0.8
ma=1.6
tb4=290
ratio=b2/b1
index=where(ratio lt mi and ratio gt ma and b4 lt tb4, count)
IF count ne 0 THEN nuv2[index] = 0

; 3o. Critério - Valor da Banda 5

nuv3=make_array(nc,nl,/byte,value=1)
v_b5=280
index=where(b5 lt v_b5, count)
IF count ne 0 THEN nuv3[index] = 0

nuv=nuv1*nuv2*nuv3
return, nuv
END
```

7.6. Apêndice 6 – Rotina IDL para cálculo do NDVI (mod_ndvi)

```
; NOME: mod_ndvi
;
; FINALIDADE: Faz o cálculo do NDVI.
;   Considera mascaramento de pixels com ângulo zenital solar e ângulo de varredura inaptos para análise.
;   Valores dos ângulos máximos aceitáveis para mascaramento devem ser informados no módulo principal
;   (mod_nav)
;
;
; ENTRADA: bandas 1 e 2.
;
; SAÍDA: imagem NDVI, com valores flutuantes entre -1 e +1 ou escalonados em 256 NC, conforme opção
;   configurada no módulo principal (mod_nav);
;
; ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO:
;   15/12/2004

FUNCTION mod_ndvi, banda1=banda1, banda2=banda2, sza=sza, scan=scan, ang_sz=ang_sz, $
    ang_sc=ang_sc, esc=esc, m_sza=m_sza, m_scan=m_scan

index=where(finite(banda1) eq 0, count)
IF count ne 0 THEN banda1[index] = 0
index=where(finite(banda2) eq 0, count)
IF count ne 0 THEN banda2[index] = 0
b1n=float(banda1)
b2n=float(banda2)
ndvi = (b2n-b1n)/(b2n+b1n)

; Verificando ângulos

IF keyword_set(m_sza) and keyword_set(sza) THEN BEGIN
    index=where(sza/10 gt ang_sz, count)
    IF count ne 0 THEN ndvi[index] = -1.1
ENDIF

IF keyword_set(m_scan) and keyword_set(scan) THEN BEGIN
    index=where(scan/10 gt ang_sc, count)
    IF count ne 0 THEN ndvi[index] = -1.1
ENDIF

IF keyword_set(esc) THEN BEGIN
    ndvi = bytscl(ndvi, min=-1, max=1, top=255)
    data_type=1
ENDIF

return, ndvi

END
```

7.7. Apêndice 7 – Rotina IDL para cálculo do NDMI (mod_ndmi)

```
; NOME: mod_ndmi
;
; FINALIDADE: Faz o cálculo do NDMI.
;   Considera mascaramento de pixels com ângulo zenital solar e ângulo de varredura inaptos para análise.
;   Valores dos ângulos máximos aceitáveis para mascaramento devem ser informados no módulo principal
;   (mod_nav)
;
;
; ENTRADA: bandas 2 e 3A.
;
; SAÍDA: imagem NDMI, com valores flutuantes entre -1 e +1 ou escalonados em 256 NC, conforme opção
;   configurada no módulo principal (mod_nav);
;
; ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO:
;   15/12/2004

FUNCTION mod_ndvi, banda2=banda2, banda3=banda3, sza=sza, scan=scan, ang_sz=ang_sz, $
    ang_sc=ang_sc, esc=esc, m_sza=m_sza, m_scan=m_scan

index=where(finite(banda2) eq 0, count)
IF count ne 0 THEN banda2[index] = 0
index=where(finite(banda3) eq 0, count)
IF count ne 0 THEN banda3[index] = 0
b1n=float(banda2)
b2n=float(banda3)
ndmi = (b2n-b1n)/(b2n+b1n)

; Verificando ângulos

IF keyword_set(m_sza) and keyword_set(sza) THEN BEGIN
    index=where(sza/10 gt ang_sz, count)
    IF count ne 0 THEN ndmi[index] = -1.1
ENDIF

IF keyword_set(m_scan) and keyword_set(scan) THEN BEGIN
    index=where(scan/10 gt ang_sc, count)
    IF count ne 0 THEN ndmi[index] = -1.1
ENDIF

IF keyword_set(esc) THEN BEGIN
    ndmi = bytscl(ndmi, min=-1, max=1, top=255)
    data_type=1
ENDIF

return, ndmi

END
```

7.8. Apêndice 8 – Rotina IDL para geração de figuras JPEG (mod_fig)

```
; NOME: mod_fig
;
; FINALIDADE: geração de imagens no formato JPEG com sobreposição de informações cartográficas.
;
; ENTRADA: matrizes das bandas espectrais ou de outra natureza (NDVI, máscaramento de nuvens, etc).
;
; SAÍDA: imagens formato JPEG.
;
; ÚLTIMA DATA DE ATUALIZAÇÃO:
; 12/04/2006

FUNCTION mod_fig, vetor, nc, nl, fid=fid,ULln, ULlt, LRln, LRlt, r1=r1, g1=g1, b1=b1, arq=arq, $
    percent=percent,titulo, sub1, sub2, texto_sub=texto_sub,dir, color_table=color_table, legenda=legenda,$
    nome, nome_jpeg=nome_jpeg,texto_grid=texto_grid, texto_titulo=texto_titulo,im_jpg,$
    nor, GLINESTYLE=GLINESTYLE, esp=esp

; Definindo coordenadas das extremidades da imagem
xf = [0]
yf = [0]
envi_convert_file_coordinates, fid, xf, yf, ULln, ULlt, /to_map
xf = [nc-1]
yf = [nl-1]
envi_convert_file_coordinates, fid, xf, yf, LRln, LRlt, /to_map
ULlt=ULlt[0,0]
ULln=ULln[0,0]
LRlt=LRlt[0,0]
LRln=LRln[0,0]
LLlt=LRlt
LLln=ULln
URln=LRln
URlt=LRlt

; Escalonando em 8 bits de acordo com valores máximos e mínimos, com porcentagem de saturação.

range = imclip_2(r1,percent=percent)
r1=bytsc1(r1, min=range[0], max=range[1])
range = imclip_2(g1,percent=percent)
g1=bytsc1(g1, min=range[0], max=range[1])
range = imclip_2(b1,percent=percent)
b1=bytsc1(b1, min=range[0], max=range[1])

;Sobrepondo o vetor político, se presente

IF keyword_set(vetor) THEN BEGIN
    envi_open_data_file, vetor, /envi, r_fid=fidv
    envi_file_query, fidv, ns=nc_v, nl=nl_v, XSTART=XSTART, YSTART=YSTART
    envi_file_mng, id=fidv, /remove
    OPENR, lun, vetor, /GET_LUN
    v = bytarr(nc_v, nl_v)
    READU, lun, v
    FREE_LUN, lun
    IF nc eq nc_v and nl eq nl_v THEN BEGIN
        index=where(v eq 255, count)
```

```

        IF count ne 0 THEN r1[index] = 0
        IF count ne 0 THEN g1[index] = 0
        IF count ne 0 THEN b1[index] = 0
    ENDIF ELSE BEGIN
        print,"
        print, 'Vetor e imagem não são do mesmo tamanho. Sobreposição não realizada.'
        print,"
    ENDELSE
ENDIF

```

; Definindo cores

```

Loadct,0
device, Decomposed=1
white = GetColor('white', 17)
black = GetColor('black', 18)
!P.Background = white
!P.Color=white
loadct, color_table

```

; Determinando o tamanho da figura, considerando as margens

```

wxsize=nc+35
ysize=nl+95
p1=float(1725/float(nc))/100
p2=float(5400/float(nl))/100
p3=1-p1
p4=1-float((4100/float(nl))/100)
window, xsize=wxsize, ysize=ysize,/pixmap

```

; Definindo coordenadas do grid

```

map_set, limit=[LLlt,ULln,ULlt,LRln], Position=[p1, p2, p3, p4]
r1 = Map_Image(r1, xstart, ystart, xsize, ysize, LatMin=LRlt, LatMax=ULlt, LonMin=LLln, LonMax=LRln, $
    compress=1)
g1 = Map_Image(g1, xstart, ystart, xsize, ysize, LatMin=LRlt, LatMax=ULlt, LonMin=LLln, LonMax=LRln, $
    compress=1)
b1 = Map_Image(b1, xstart, ystart, xsize, ysize, LatMin=LRlt, LatMax=ULlt, LonMin=LLln, LonMax=LRln, $
    compress=1)

```

; Gerando imagem de saída

```

TVLCT, r, g, b, /Get
s = Size(bytarr(xsize,ysize), /Dimensions)
RGB = BytArr(3, s[0], s[1])
RGB[0,*,*] = r[r1]
RGB[1,*,*] = g[g1]
RGB[2,*,*] = b[b1]
tv, RGB, xstart, ystart, true=1, order=1

```

; Sobrepondo grid e imprimindo informações sobre a figura

```

Map_Grid, color=black, Londel=esp, Latdel=esp,/noborder, GLINESTYLE=GLINESTYLE, $
    box_axes=1, label=1,/noerase,charsize=texto_grid
XYOUTS, nc/2, ysize-25, titulo,/device, ALIGNMENT=0.5, color=black, CHARSIZE=texto_titulo
XYOUTS, 15, 30,sub1,/DEVICE,color=black,CHARSIZE=texto_sub

```

```
XYOUTS, 15, 10,sub2,/DEVICE,color=black,CHARSIZE=texto_sub
```

```
; Inserindo rosa dos ventos, se presente  
IF keyword_set(nor) THEN BEGIN  
  envi_open_data_file, nor, /envi, r_fid=fidn  
  envi_file_query, fidn, ns=nsn, nl=nl, nb=nb  
  OPENR, lun, nor, /GET_LUN  
  norte = bytarr(nsn, nl)  
  READU, lun, norte  
  FREE_LUN, lun  
  tv, norte, wxsize-50,4, order=1  
  envi_file_mng, id=fidn, /remove  
ENDIF
```

```
; Inserindo legenda, se necessário
```

```
IF keyword_set(legenda) THEN BEGIN  
  ; Posição da legenda  
  p1=1-float(27000/float(nc))/100  
  p2=float(1536/float(nl))/100  
  p3=1-float(7500/float(nc))/100  
  p4=float(2560/float(nl))/100  
  colorbar = Obj_New("COLORBAR", Range=[range[0], range[1]],  
    NCOLORS=256,COLOR=0,POSITION=[p1, p2, p3, p4], CHARSIZE=.5)  
  colorbar->Draw  
  colorbar->SetProperty, /Erase  
  Obj_Destroy, colorbar  
  XYOUTS, wxsize-175, 38,legenda,/DEVICE, color=black,alignment=0.5, CHARSIZE=texto_sub  
ENDIF
```

```
im_jpg = DIR+nome+nome_jpeg  
image = tvread(filename=im_jpg, /JPEG,/nodialog, quality=100)
```

```
return,im_jpg
```

```
END
```

7.9. Apêndice 9 – Rotina IDL para a geração das composições de máximo valor

```
; NOME: mvc
;
; FINALIDADE: geração de imagens de máximo valor composto.
;
; ENTRADA: imagens *.prd ou outro formato ENVI contendo imagens diárias de NDVI.
;
;SAÍDA: composições máximas (*.mvc).
;
; ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO:
; 30/02/2006
;
; OBSERVAÇÃO:
; Configurar parâmetros no corpo do programa.

PRO M

compile_opt STRICTARR
;OPERANDO EM BATCH MODE
envi, /restore_base_save_files
envi_batch_init

; Configurações

DIR='C:\Tese\NOAA\Mar_2004\Bruto\' ; diretório de trabalho. Não omitir '/' no final
tipo='*.prd' ; extensão dos arquivos a serem selecionados
n_ban=2 ; número de bandas do arquivo de entrada
banda=2 ; número da banda dos dados de entrada
a_envi=1 ; abre MVC no ENVI? SIM=1, NÃO=0

; Selecionando arquivos de entrada

ARQ = DIALOG_PICKFILE(/READ, Title=['Selecione os arquivos de entrada'],$
    FILTER = [tipo],path=dir,/MULTIPLE_FILES)
n = N_ELEMENTS(arq)
print,'Número de imagens: ', STRTRIM(n,2)

; Abrindo as imagens selecionadas

FOR i=0,n-1 do BEGIN
    envi_open_file, arq[i], /no_realize, r_fid=fidp
    IF (fidp eq -1) THEN return
    envi_file_query, fidp, ns=nc, nl=nl, nb=nbp, data_type=data_type, interleave=interleave,file_type=file_type,$
        byte_order=byte_order
        dims = [-1l, 0, nc-1, 0, nl-1]
    map_info = envi_get_map_info(fid=fidp)
    IF data_type eq 2 THEN Imagem = intarr(nc,nl)
    IF data_type eq 4 THEN Imagem = fltarr(nc,nl)
    IF data_type eq 1 THEN Imagem = bytarr(nc,nl)

; Montando a matriz e gerando MVC

    OPENR, cab, arq[i],/GET_LUN
    IF data_type eq 4 THEN temp = fltarr(nc,nl,n_ban)
```

```

IF data_type eq 1 THEN temp = bytarr(nc,nl,n_ban)
IF data_type eq 2 THEN temp = intarr(nc,nl,n_ban)

READU, cab, temp
FREE_LUN, cab
index=where(finite(temp) eq 0, count)
IF count ne 0 THEN temp[index] = -1.1
temp=temp[*,* ,banda-1]
IF i eq 0 THEN comp = temp
comp = comp > temp
Imagem[*,* ,0] = comp
endfor

numim=STRTRIM(n,2)
arq_sai = DIALOG_PICKFILE(/WRITE, File='Composição.mvc',$
    TITLE=['Selecione o nome para composição máxima'],FILTER = ['*.mvc'],$
    PATH=DIR, DEFAULT_EXTENSION='mvc')
IF arq_sai eq " THEN BEGIN
    print, 'Nome de saída não selecionado. Fim do programa'
    return
ENDIF

OPENW, unit, arq_sai, /GET_LUN
WRITEU, unit, imagem
FREE_LUN, unit
print, 'ARQUIVO *** ',arq_sai,' *** GERADO.'

c_dir = STRLEN(DIR)
nome = STRMID(arq_sai, 0,STRPOS(arq_sai,".",/reverse_search))
nome = STRMID(nome, c_dir, STRPOS(arq_sai,'.',/reverse_search))
nome2 = DIR+nome

ENVI_SETUP_HEAD, fname=nome2, xstart=0, ystart=0, ns=nc, nl=nl, nb=1, names='MVC', $
    map_info=map_info, interleave=0, data_type=data_type, offset=0, file_type=file_type,$
    byte_order=0, /write

; Fechando imagens abertas

fids = envi_get_file_ids()
IF (fids[0] eq -1) THEN return
FOR n = 0, n_elements(fids) - 1 do BEGIN
    envi_file_mng, id=fids[n], /remove
endfor

; Abrindo composição no ENVI

IF a_envi eq 1 THEN BEGIN
    envi_open_file, arq_sai, r_fid=fidm
    IF (fidm eq -1) THEN return
ENDIF

END

```

7.10. Apêndice 10 – Rotina IDL para a geração automática dos perfis temporais de NDVI

```
; NOME: perfil
;
; FINALIDADE: Faz a leitura de um conjunto de coordenadas e extrai
; o perfil espectral de um conjunto de imagens de múltiplas bandas.
; Exporta para formato compatível com Excel.
; Exporta gráfico do perfil para JPEG.
; Calcula parâmetros quantitativos do perfil.
;
; ENTRADAS: Arquivo formato ASCII, contendo latitudes e longitudes dos alvos. Extensão *.txt
; Imagem de múltiplas bandas, formato ENVI, com NDVI flutuante. Extensão *.mvc
; Máscaras booleanas, formato ENVI, com os limites municipais. Extensão *.img
;
; SAÍDAS: Planilha de cada município, formato *.SLK
; JPEG do perfil temporal
;
; ÚLTIMA DATA DE ATUALIZAÇÃO:
; 15/08/2006

PRO i

;OPERANDO EM BATCH MODE
compile_opt STRICTARR
envi, /restore_base_save_files
envi_batch_init

; Diretórios de trabalho
DIR='C:\Tese\NOAA\0304\'
; Diretório com os arquivos ASCII
DIR3=DIR+'ASCII\'
; Diretório com a composição multi-temporal
dir1=DIR+'MVC\'
; Diretório com as imagens booleanas dos municípios
DIR4=dir+'mascaras\'

; Identificação da Safra
safra='03/04'
iden='_0304' ; Sulfixo dos arquivos de saída

;
;-----
; CONFIGURAÇÕES:
; 1=SIM, 0=NÃO
a_media=1 ; Calcular o perfil numa média 3x3?
p_cheio=0 ; Preencher curva do perfil médio?
p_ind=1 ; Plotar perfis individuais?
sensor=1 ; Sensor 1-AVHRR, 2-MODIS, 3-SPOT/VEGETATION
int_comp=15 ; Intervalo das composições 15=Quinzenal, 10=Decendial
limites_auto=0 ; Determinar início/fim do ciclo? Se a opção for NÃO, preencher os campos abaixo:
IF limites_auto eq 0 THEN begin
    ini=0 ; início do ciclo
    fin=13 ; final do ciclo
ENDIF
exp_pontos=0 ; Exportar pontos início/final? Os arquivos serão gravados na pasta do diretório de trabalho
ler_pontos=0 ; Leitura dos pontos início/final? Para funcionar, limites_auto deve ser NÃO
```

```

correcao=0      ; Correção de variações do perfil. Ajustar no corpo do programa.
g_plot=1       ; Gerar saída JPEG do perfil? Para configurações adicionais, ver graf.pro
yrange=[0,0.9] ; Range do eixo Y no gráfico de saída
nome_y='NDVI'  ; Nome do eixo Y do gráfico
;

```

```

; Carregando arquivo ASCII com as coordenadas de interesse

```

```

arq2 = DIALOG_PICKFILE(/READ, Title=['Selecione o arquivo de coordenadas'],$
  FILTER = ['*.txt'],path=dir3)
n_arq2 = N_ELEMENTS(arq2)
IF (n_arq2 EQ 0) THEN return
soja_noaa = READ_ASCII(arq2)
soja_noaa=soja_noaa.(0)
pix_s=n_elements(soja_noaa)/2

```

```

; Confirmação para exportar pontos de início e fim do ciclo

```

```

IF keyword_set(exp_pontos) THEN BEGIN
  print, 'Exportando pontos. Confirme com teclando "s": ' & Perg=get_kbrd(1)
  IF Perg ne 's' THEN return
ENDIF

```

```

; Criando diretório de saída

```

```

IF int_comp EQ 10 THEN BEGIN
  file_mkdir, dir+'10' ; para decendial
  dir2=dir+'10\'
ENDIF

```

```

IF int_comp EQ 15 THEN BEGIN
  file_mkdir, dir+'15' ; para quinzenal
  dir2=dir+'15\'
ENDIF

```

```

; Carregando arquivo de composições máximas

```

```

arq = DIALOG_PICKFILE(/READ, Title=['Selecione o arquivo com as composições máximas'],$
  FILTER = ['*.mvc'],path=dir1)
n_arq = N_ELEMENTS(arq)
IF (n_arq EQ 0) THEN return

```

```

; Extraindo nome da Composição

```

```

dir_t = STRMID(arq, 0,STRPOS(arq,"\"./reverse_search))
c_dir = STRLEN(dir_t)+1
nome_c = STRMID(arq, 0,STRPOS(arq,"\"./reverse_search))
nome_c = STRMID(nome_c, c_dir, STRPOS(arq,'\"./reverse_search))

```

```

; Abrindo a imagem multi-temporal

```

```

envi_open_file, arq, /no_realize, r_fid=fidp
IF (fidp EQ -1) THEN return

```

```

envi_file_query, fidp, ns=nc, nl=nl, nb=nb, data_type=data_type,$
  interleave=interleave,file_type=file_type, byte_order=byte_order

```

```

    dims = [-11, 0, nc-1, 0, nl-1]
map_info = envi_get_map_info(fid=fidp)
IF data_type EQ 2 THEN Imagem = intarr(nc,nl,nb)
IF data_type EQ 4 THEN Imagem = ftarr(nc,nl,nb)
IF data_type EQ 1 THEN Imagem = bytarr(nc,nl,nb)
OPENR, cabe, arq,/GET_LUN
READU, cabe, Imagem
FREE_LUN, cabe

; Carregando as imagens booleanas (máscaras municipais)

arq3 = DIALOG_PICKFILE(/READ, Title=['Selecione as máscara municipais'],$
    FILTER = ['*.img'],path=DIR4, /MULTIPLE_FILES)
n = N_ELEMENTS(arq3)

; Estabelecendo contagem, caso número de municípios seja >1
FOR a=0,n-1 DO BEGIN

    envi_open_file, arq3[a], r_fid=fid_m
    IF (fid_m EQ -1) THEN return

    envi_file_query, fid_m, ns=nc_m, nl=nl_m, nb=nb_m
    dim_m = [-11, 0, nc_m-1, 0, nl_m-1]
    map_info = envi_get_map_info(fid=fid_m)

; Extrairdo nome do Município

    c_dir = STRLEN(dir4)
    nome = STRMID(arq3[a], 0,STRPOS(arq3[a],"/reverse_search))
    nome = STRMID(nome, c_dir, STRPOS(arq3[a],"/reverse_search))
    print, nome

; Leitura dos arquivos de pontos

    IF int_comp EQ 10 THEN BEGIN
        IF keyword_set(ler_pontos) THEN BEGIN
            arq_pontos=dir+'pontos_decendial'+nome+'_pontos.xls'
            file=FINDFILE(arq_pontos)
            IF not keyword_set(file) THEN goto, jump2
            pontos = READ_SYLK(arq_pontos,/COLMAJOR, /ARRAY, nrows=7, ncols=2, $
                startrow=0, startcol=0)
            ini=pontos[1,0]
            fin=pontos[1,1]
        ENDIF
    ENDIF

    IF int_comp EQ 15 THEN BEGIN
        IF keyword_set(ler_pontos) THEN begin
            arq_pontos=dir+'pontos_quinzenal'+nome+'_pontos.xls'
            file=FINDFILE(arq_pontos)
            IF not keyword_set(file) THEN goto, jump2
            pontos = READ_SYLK(arq_pontos,/COLMAJOR, /ARRAY, nrows=7, ncols=2, startrow=0, $
                startcol=0)
            ini=pontos[1,0]
            fin=pontos[1,1]
        ENDIF
    ENDIF

```

```
ENDIF
ENDIF
```

; Calculando coordenadas limites do município

```
envi_convert_file_coordinates, fid_m, 0, 0, xmax, ymin, /to_map
envi_convert_file_coordinates, fid_m, nc_m-1, nl_m-1, xmin, ymax, /to_map
```

; Verificando soja dentro do município

```
temp=make_array(2,pix_s,value=-10,/float)
FOR b=0l, pix_s-1 DO BEGIN
  xmap = soja_noaa[0,b]
  ymap = soja_noaa[1,b]

  IF abs(xmap) GT abs(xmin) and abs(xmap) LT abs(xmax) and abs(ymap) $
  GT abs(ymin) and abs(ymap) LT abs(ymax) THEN BEGIN
    envi_convert_file_coordinates, fid_m, xf_m, yf_m, xmap, ymap
    mascara_mun = ENVI_GET_DATA(fid=fid_m, dims=dim_m, pos=0)
```

; Convertendo coordenadas

```
envi_convert_file_coordinates, fidp, xf, yf, xmap, ymap
IF mascara_mun[xf_m, yf_m] EQ 1 THEN BEGIN
  temp[0,b]=round(xf)
  temp[1,b]=round(yf)
ENDIF
ENDIF
ENDFOR
```

; Filtrando áreas

```
index_2=where(temp ne -10, count)
IF index_2[0,0] ne -1 THEN BEGIN
  ind_2 = ARRAY_INDICES(temp, index_2)
  pix_soja=n_elements(ind_2)/4
  soja_mun=fltarr(2, pix_soja)
  soja_mun=temp[where(temp GT 0)]
  soja_mun=reform(soja_mun,2,pix_soja)
  num_pixels=STRTRIM(n_elements(soja_mun)/2,1)
ENDIF ELSE goto, jump1
print, 'Número de pixels Soja: ', num_pixels
```

; Caso o número de áreas seja superior a 100, o sistema seleciona aleatoriamente 100 perfis

```
IF num_pixels GT 100 THEN BEGIN
  indices=randomu(seed, 100)*num_pixels
  soja_mun=soja_mun[* ,indices]
  num_pixels=STRTRIM(n_elements(soja_mun)/2,1)
ENDIF
```

; Montando a matriz dos dados dos perfis

```
txt_saida=fltarr(num_pixels+10,nb)
```

```
FOR r=0, num_pixels-1 DO BEGIN
```

```

xf=soja_mun[0,r]-1
yf=soja_mun[1,r]-1
perfil=fltarr(1,nb)

FOR t=0, nb-1 DO BEGIN
  matriz=Imagem['*',*,t]
  IF keyword_set(a_media) THEN BEGIN

; Tirando a média da janela 3x3
    IF r EQ 0 AND t EQ 0 THEN print, '...Extraindo a média da janela 3 x 3'
    med=[(matriz[xf-1,yf-1]),(matriz[xf,yf-1]), (matriz[xf+1,yf-1]), $
(matriz[xf-1,yf]),(matriz[xf,yf]),(matriz[xf+1,yf]), $
(matriz[xf-1,yf+1]),(matriz[xf,yf+1]),(matriz[xf+1,yf+1])]

; Verificando presença de nuvem
    IF min (med) EQ -1.1 THEN med=-1.1
    media=float(mean(med))
    perfil[0,t]=media
    txt_saida[r,*]=perfil
  ENDIF ELSE BEGIN
    perfil[0,t]=matriz[xf,yf]
    txt_saida[r,*]=perfil
  ENDELSE
ENDFOR
ENDFOR

```

; Substituindo nuvens pelo valor médio entre as composições adjacentes

```

FOR k=0, num_pixels-1 DO BEGIN
  FOR v=0, nb-1 DO BEGIN
    IF k EQ 0 AND v EQ 0 THEN print, $
    '...Substituindo o valor de nuvem pela média das composições próximas'
    IF txt_saida[k,v] EQ -1.1 THEN BEGIN
      IF v ne 0 and v ne nb-1 THEN BEGIN
        m_temp=[txt_saida[k,v-1],txt_saida[k,v+1]]
        m_temp=mean(m_temp)
        txt_saida[k,v] = m_temp
      ENDIF
    ENDIF
  ENDFOR
ENDFOR

```

```

IF keyword_set(correcao) THEN BEGIN
  inicial=1
  fim=nb-1
  txt_temp=txt_saida
  print, '...Verificando variações bruscas do NDVI'
  txt_temp=txt_saida

```

```

FOR f=0, num_pixels-1 DO BEGIN

; Verificando pico do perfil individual

  teste=txt_saida[f,*]
  FOR m=0, nb-2 DO BEGIN

```

```

    negs = WHERE(teste[m] EQ max(teste))
    IF negs EQ 0 THEN goto, ok4 ELSE continue
ENDFOR

ok4:pico_1=m

; Verificando variação no NDVI
FOR s=0, nb-1 DO BEGIN
    IF s GT inicial and s LE pico_1 THEN BEGIN
        IF txt_saida[f,s] LT txt_saida[f,s-1]*0.9 THEN BEGIN
            m_temp=[txt_saida[f,s-1],txt_saida[f,s+1]]
            m_temp=mean(m_temp)
            txt_saida[f,s] = m_temp
        ENDIF
    ENDIF
ENDFOR

    IF s GT pico_1 and s LT fim THEN BEGIN
        IF txt_saida[f,s] LT txt_saida[f,s-1]*1.1 THEN BEGIN
            m_temp=[txt_saida[f,s-1],txt_saida[f,s+1]]
            m_temp=mean(m_temp)
            txt_saida[f,s] = m_temp
        ENDIF
    ENDIF
ENDFOR
ENDFOR
ENDIF

```

```
txt_saida=transpose(txt_saida)
```

;Extraindo perfil médio

```

p_medio=fltarr(nb,1)
FOR p=0, nb-1 DO BEGIN
    media=mean(txt_saida[p,0:num_pixels-1])
    p_medio[p,0]=media
ENDFOR

```

;Determinando o pico do perfil médio

```

FOR b=0, nb-2 DO BEGIN
    negs = WHERE(p_medio[b] EQ max(p_medio))
    IF negs EQ 0 THEN goto, ok2 ELSE continue
ENDFOR
ok2:pico=b

```

; Determinando início e fim do ciclo

```

IF keyword_set (limites_auto) THEN BEGIN
    FOR g=0, nb-1 DO BEGIN
        negs = WHERE(p_medio[g] EQ min(p_medio[1:b]))
        IF negs EQ 0 THEN goto, ok3 ELSE continue
    ENDFOR
    ok3:ini=g

    FOR g=0, nb-1 DO BEGIN
        negs = WHERE(p_medio[g] EQ min(p_medio[b:nb-1]))
    ENDFOR

```

```

        IF negs EQ 0 THEN goto, ok5 ELSE continue
    ENDFOR
    ok5:fin=g
ENDIF

```

; Adicionando o perfil medio à matriz

```

txt_saida=transpose(txt_saida)
p_medio=transpose(p_medio)
txt_saida[num_pixels,*]=p_medio
txt_saida=transpose(txt_saida)
p_medio=transpose(p_medio)

```

;Adicionando Cabeçalho

```

cab=strarr(num_pixels+10,1)
FOR r=0, num_pixels DO BEGIN
    cab[r,0]='Área_'+string(r+1)]
ENDFOR

cab[num_pixels,0]='Média']
cab=transpose(cab)
excel=[cab,string(txt_saida)]

```

;Determinando outros períodos para composições decendiais

```

IF int_comp EQ 10 THEN BEGIN
    ciclo=(fix(fin)-fix(ini))*10
    ini_2=ini
    fin_2=fin-1
    ini_3=ini
    fin_3=fin-2
    ini_4=ini
    fin_4=fin-3
    ini_5=ini
    fin_5=fin-4
    ini_6=ini
    fin_6=pico
    ini_7=pico
    fin_7=fin
    index=where(p_medio[0:fin] ge 0.3, count)
    ini_8=min(index)
    fin_8=max(index)
ENDIF

```

;Determinando outros períodos para composições decendiais

```

IF int_comp EQ 15 THEN BEGIN
    ciclo=(fix(fin)-fix(ini))*15
    ini_2=ini
    fin_2=fin-1
    ini_3=ini
    fin_3=fin-2
    ini_4=ini
    fin_4=fin-3
    ini_5=ini

```

```

    fin_5=fin-4
    ini_6=ini
    fin_6=pico
    ini_7=pico
    fin_7=fin
    index=where(p_medio[0:fin] ge 0.3, count)
    ini_8=min(index)
    fin_8=max(index)
ENDIF

```

; Gerando PLOT

```

nome_2=nome+iden
IF keyword_set(g_plot) THEN BEGIN
grafico = graf(int_comp=int_comp, nb=nb, nome_c=nome_c, dir2=dir2, nome, txt_saida=txt_saida,$
    ini=ini, fin=fin, nlinhas=num_pixels, p_medio=p_medio, pico=pico, ciclo=ciclo, p_ind=p_ind,$
    p_cheio=p_cheio, sensor=sensor, yrange=yrange, xrange=[0,nb-1], safra, nome_2=nome_2,$
    nome_y=nome_y)
ENDIF

```

; Cálculo dos Parâmetros Quantitativos

```

P1=param(inicio=ini, final=fin, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, $
    v_medio=v_medio, amplitude=amplitude, parametros=P1, v_max=v_max)
P2=param2(inicio=ini_2, final=fin_2, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P2)
P3=param2(inicio=ini_3, final=fin_3, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P3)
P4=param2(inicio=ini_4, final=fin_4, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P4)
P5=param2(inicio=ini_5, final=fin_5, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P5)
P6=param2(inicio=ini_6, final=fin_6, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P6)
P7=param2(inicio=ini_7, final=fin_7, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P7)
P8=param2(inicio=ini_8, final=fin_8, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, v_medio=v_medio,$
    parametros2=P8)

```

; Exportando para planilha para formato SLK

```

nome2=dir2+nome_2+'_ndvi.slk'
excel_2=strarr(nb+1,num_pixels+10)
excel_2[1,0]=['ai', 'soma','v_medio','v_max','amplitude']
excel_2[1,1]=P1
excel_2[1,2]=P2
excel_2[1,3]=P3
excel_2[1,4]=P4
excel_2[1,5]=P5
excel_2[1,6]=P6
excel_2[1,7]=P7
excel_2[1,8]=P8
excel_2=[excel, excel_2]
txt_excel = WRITE_SYLK(nome2, excel_2)
print, 'Arquivo: '+nome2+' criado.'

```

; Exportando pontos do início e fim do ciclo

```
IF keyword_set(exp_pontos) THEN BEGIN
  IF int_comp EQ 10 THEN BEGIN
    pontos=strarr(8,8)
    pontos[0,0]='ini', 'fin'
    pontos[0,1]=[ini, fin]
    file_mkdir, dir+'Pontos_decendial'
    pontos_excel = WRITE_SYLK(dir+'pontos_decendial'+nome+'_pontos.xls', pontos)
    print, 'Arquivo: '+dir+'pontos_decendial'+nome+'_pontos.xls'+ ' criado.'
  ENDIF

  IF int_comp EQ 15 THEN BEGIN
    pontos=strarr(8,8)
    pontos[0,0]='ini', 'fin'
    pontos[0,1]=[ini, fin]
    file_mkdir, dir+'Pontos_Quinzenal'
    pontos_excel = WRITE_SYLK(dir+'pontos_quinzenal'+nome+'_pontos.xls', pontos)
    print, 'Arquivo: '+dir+'pontos_quinzenal'+nome+'_pontos.xls'+ ' criado.'
  ENDIF
ENDIF

jump1: IF index_2[0,0] EQ -1 THEN begin
  print, nome+' sem locais de soja'
ENDIF

jump2: IF keyword_set(ler_pontos) and not keyword_set(file) THEN print, $
nome+' sem arquivo de pontos com datas'
```

ENDFOR

; Fechando imagens abertas

```
fids = envi_get_file_ids()
IF (fids[0] EQ -1) THEN return
FOR n = 0, n_elements(fids) - 1 DO BEGIN
  envi_file_mng, id=fids[n], /remove
ENDIF
```

END

; Sub-função para cálculo dos parâmetros no período P1

```
FUNCTION param, inicio=inicio, final=final, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, $
v_max=v_max, v_medio=v_medio, amplitude=amplitude, parametros=parametros, corte=corte
```

; No período P1 estão sendo calculados: ai, soma, v_medio, v_max e amplitude

```
x=indgen(nb)
ai=int_tabulated(x[inicio:final],p_medio[inicio:final])
v_max=max(p_medio[inicio:final])
v_min=min(p_medio[inicio:final])
soma=total(p_medio[inicio:final])
v_medio=mean(p_medio[inicio:final])
amplitude=v_max-v_min
parametros=[ai, soma, v_medio, v_max, amplitude]
```

```
return, parametros
```

```
END
```

```
; Sub-função para cálculo dos parâmetros nos demais períodos
```

```
FUNCTION param2, inicio=inicio, final=final, p_medio=p_medio, nb=nb, ai=ai, soma=soma, $  
v_medio=v_medio, parametros2=parametros2
```

```
; Nos demais períodos estão sendo calculados: ai, soma e v_medio.
```

```
x=indgen(nb)  
ai=int_tabulated(x[inicio:final],p_medio[inicio:final])  
soma=total(p_medio[inicio:final])  
v_medio=mean(p_medio[inicio:final])  
parametros2=[ai, soma, v_medio]  
return, parametros2
```

```
END
```

```
; Sub-função para geração dos gráficos de saída
```

```
FUNCTION p_curva, inicial=inicial, final=final, p_medio=p_medio, nb=nb, xpoly, ypoly
```

```
ini_y=p_medio[inicial]  
fin_y=p_medio[final]  
x=indgen(nb)  
indices = Value_Locate(x, [inicial, final])  
lowIndex = indices[0]  
highIndex = indices[1]  
IF x[lowIndex] LT inicial THEN lowIndex = lowIndex + 1  
IF x[highIndex] GT final THEN highIndex = highIndex - 1  
xpoly = [inicial, inicial, x[lowIndex:highIndex], final, final]  
ypoly = [!y.CRange[0], ini_y, p_medio[lowIndex:highIndex], fin_y, !y.CRange[0]]  
return, xpoly  
return, ypoly
```

```
END
```

```
FUNCTION graf, int_comp=int_comp, nb=nb, nome_c=nome_c, dir2=dir2, nome, txt_saida=txt_saida,$  
ini=ini, fin=fin, nlinhas=nlinhas, p_medio=p_medio, pico=pico, ciclo=ciclo, p_ind=p_ind,$  
p_cheio=p_cheio, sensor=sensor, yrange=yrange, xrange=xrange, safra, nome_2=nome_2, nome_y=nome_y
```

```
; Carregando cores
```

```
azul = FSC_Color('blue')  
magenta = FSC_Color('magenta')  
preto = FSC_Color('black')  
cinza = FSC_Color('grey')  
amarelo = FSC_Color('yellow')
```

```
IF sensor EQ 1 THEN Sen='AVHRR/3'  
IF sensor EQ 2 THEN Sen='MODIS'  
IF sensor EQ 3 THEN Sen='SPOT/VEG'
```

```
; Configuração dos meses para composições decendiais
```

```

IF int_comp EQ 10 THEN BEGIN
  SUBTITLE='COMPOSIÇÕES DECENDIAIS - '+Sen
  XRANGE=XRANGE
  XTICKNAME=['OUT','NOV','DEZ','JAN','FEV','MAR','ABR','']
  XTICKINTERVAL=3
  XMINOR=3
  Nomes=['1a. OUT','2a. OUT','3a. OUT','1a. NOV','2a. NOV','3a. NOV','1a. DEZ','2a. DEZ',$
        '3a. DEZ','1a. JAN','2a. JAN','3a. JAN','1a. FEV','2a. FEV','3a. FEV','1a. MAR',$
        '2a. MAR','3a. MAR.','1a. ABR','2a. ABR','3a. ABR']
ENDIF

```

; Configuração dos meses para composições quinzenais

```

IF int_comp EQ 15 THEN BEGIN
  SUBTITLE='COMPOSIÇÕES QUINZENAIS - '+Sen
  XRANGE=XRANGE
  XTICKNAME=['1a. OUT','','1a. NOV','','1a. DEZ','','1a. JAN','','1a. FEV','','1a. MAR','','1a. ABR','']
  XTICKINTERVAL=1
  XMINOR=1
  Nomes=['1a. OUT','2a. OUT','1a. NOV','2a. NOV','1a. DEZ','2a. DEZ','1a. JAN','2a. JAN','1a. FEV','2a. FEV',$
        '1a. MAR','2a. MAR','1a. ABR','2a. ABR']
ENDIF

```

; Nomes de saída

```

YTITLE=nome_y
YRANGE=YRANGE
filename=dir2+nome_2+'_'+nome_y

```

; Configurando cores

```

Device, Decomposed=1
white = GetColor('white', 17)
black = GetColor('black', 18)
!P.Background = white
!P.Color=white

```

; Tamanho da janela de saída

```

xsize=600
ysize=420
IF keyword_set(valores) THEN ysize=480
window, xsize=xsize,ysize=ysize,title='Perfil Temporal de '+strupcase(nome)
char=0.65
XCHARSIZE=1

```

; Montando o gráfico

```

IF keyword_set(valores) THEN BEGIN
  YMARGIN=[15,3.5]
  XMARGIN=[6.5,2]
ENDIF ELSE BEGIN
  YMARGIN=[9,4]
  XMARGIN=[6.5,2]
ENDELSE

```

```

plot, txt_saida[*], /nodata,$
  XSTYLE=1, YRANGE=YRANGE, YSTYLE=1, COLOR=0, XRANGE=XRANGE, TICKLEN=1,$
  XGRIDSTYLE=1, YGRIDSTYLE=1, XMINOR=XMINOR, YMINOR=1, XTICKNAME=XTICKNAME,$
  XTICKINTERVAL=XTICKINTERVAL, YMARGIN=YMARGIN, XMARGIN=XMARGIN,
CHARSIZE=CHAR,$
  YTITLE=YTITLE, TITLE=strupcase(nome), SUBTITLE=SUBTITLE, XCHARSIZE=XCHARSIZE

; Preenchendo o perfil médio

IF keyword_set(p_cheio) THEN BEGIN
  p_curva=p_curva(inicial=ini, final=fin, p_medio=p_medio, nb=nb, xpoly_ini, ypoly_ini)
  PolyFill, xpoly_ini, ypoly_ini, Color=cinza;, orientation=45, spacing=.2,/line_fill;, thick=2
  Plots, xpoly_ini, ypoly_ini, Color=preto, Thick=1, linestyle=2
  Plots, xpoly_ini, ypoly_ini, Color=preto, Thick=2, linestyle=0
  AXIS, YGRIDSTYLE=1, YMINOR=1, TICKLEN=1, color=0, yaxis=0, charsize=char, YSTYLE=1
  AXIS, XSTYLE=1, YRANGE=YRANGE, YSTYLE=1, COLOR=0, XRANGE=XRANGE, TICKLEN=1,$
  XGRIDSTYLE=1, YGRIDSTYLE=1, XMINOR=XMINOR, YMINOR=1, XTICKNAME=XTICKNAME,$
  XTICKINTERVAL=XTICKINTERVAL, CHARSIZE=CHAR,$
  XCHARSIZE=XCHARSIZE
ENDIF

; Plotando os perfis individuais

IF keyword_set(p_ind) THEN BEGIN
  FOR p=0, nlinhas-1 DO BEGIN
    oplot, txt_saida[*], p, color=0, LINESTYLE=1;, THICK=0
  ENDFOR
ENDIF

; Plotando o perfil médio

oplot, p_medio, color=255, THICK=3, LINESTYLE=0

; Imprimindo número de pontos:

char_inf=.55
XYOUTS, 25, 8, 'No. PONTOS : '+STRCOMPRESS(nlinhas), color=0,/DEVICE,CHARSIZE = char_inf
XYOUTS, 145, 8, 'INÍCIO: '+ nomes[ini], color=0,/DEVICE,CHARSIZE = char_inf
XYOUTS, 265, 8, 'FIM: '+ nomes[fin], color=0,/DEVICE,CHARSIZE = char_inf
XYOUTS, 385, 8, 'PICO: '+ nomes[pico], color=0,/DEVICE,CHARSIZE = char_inf
XYOUTS, 500, 8, 'CICLO: '+ STRCOMPRESS(ciclo)+' DIAS', color=0,/DEVICE,CHARSIZE = char_inf
XYOUTS, 550, 400, safra, color=0,/DEVICE,CHARSIZE = char_inf

;Gerando JPEG DO PLOT

plot_jpg = tvread(filename=filename, /JPEG,/nodialog, quality=90)

END

```

8. ANEXOS

Anexo 1 – Localização geográfica e dados estatísticos oficiais da produção de soja nos 70 municípios cobertos pela cena Landsat 223/77.

| Municípios | Latitude | Longitude | Safras | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| | | | 2002/2003 | | | 2003/2004 | | | 2004/2005 | | |
| | | | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) |
| Altamira do Paraná | -24,7980 | -52,7130 | 80 | 248 | 3,100 | 80 | 248 | 3,100 | 726 | 1.786 | 2,460 |
| Alto Piquiri | -24,0280 | -53,4410 | 12.500 | 41.875 | 2,500 | 16.000 | 36.800 | 2,300 | 16.500 | 37.950 | 2,300 |
| Anahy | -24,6440 | -53,1350 | 5.355 | 17.404 | 3,250 | 5.100 | 16.320 | 3,200 | 4.000 | 11.404 | 2,851 |
| Araruna | -23,9320 | -52,4960 | 26.600 | 71.820 | 2,700 | 29.000 | 71.891 | 2,479 | 30.000 | 67.500 | 2,250 |
| Assis Chateaubriand | -24,4200 | -53,5210 | 71.850 | 215.550 | 3,000 | 72.000 | 158.400 | 2,200 | 72.200 | 187.720 | 2,600 |
| Barbosa Ferraz | -24,0300 | -52,0120 | 6.300 | 19.530 | 3,100 | 6.400 | 19.840 | 3,100 | 7.600 | 16.948 | 2,230 |
| Boa Esperança | -24,2420 | -52,7890 | 28.500 | 84.075 | 2,950 | 28.500 | 76.950 | 2,700 | 28.500 | 67.118 | 2,355 |
| Braganey | -24,8160 | -53,1220 | 16.200 | 53.460 | 3,300 | 16.500 | 44.550 | 2,700 | 17.000 | 47.600 | 2,800 |
| Brasilândia do Sul | -24,1970 | -53,5250 | 17.000 | 54.400 | 3,200 | 20.000 | 50.000 | 2,500 | 20.000 | 54.000 | 2,700 |
| Cafelândia | -24,6180 | -53,3200 | 20.500 | 68.614 | 3,347 | 21.050 | 57.403 | 2,727 | 21.750 | 57.638 | 2,650 |
| Cafezal do Sul | -23,9020 | -53,5130 | 1.200 | 3.240 | 2,700 | 3.300 | 4.620 | 1,400 | 3.700 | 8.140 | 2,200 |
| Campina da Lagoa | -24,5920 | -52,7990 | 28.000 | 86.800 | 3,100 | 31.000 | 92.225 | 2,975 | 31.000 | 86.180 | 2,780 |
| Campo Bonito | -25,0310 | -52,9930 | 14.200 | 45.767 | 3,223 | 16.800 | 42.000 | 2,500 | 16.000 | 45.600 | 2,850 |
| Campo Mourão | -24,0460 | -52,3830 | 48.000 | 151.680 | 3,160 | 49.000 | 134.750 | 2,750 | 48.500 | 110.580 | 2,280 |
| Cascavel | -24,9560 | -53,4550 | 76.000 | 250.800 | 3,300 | 82.000 | 225.500 | 2,750 | 87.700 | 206.534 | 2,355 |
| Catanduvas | -25,2030 | -53,1570 | 12.000 | 39.000 | 3,250 | 13.500 | 37.395 | 2,770 | 15.300 | 36.720 | 2,400 |
| Céu Azul | -25,1470 | -53,8490 | 21.400 | 79.587 | 3,719 | 24.500 | 66.885 | 2,730 | 24.700 | 73.606 | 2,980 |
| Corbélia | -24,7990 | -53,3070 | 32.200 | 107.870 | 3,350 | 33.300 | 103.230 | 3,100 | 37.500 | 116.250 | 3,100 |
| Corumbataí do Sul | -24,1010 | -52,1200 | 1.500 | 4.650 | 3,100 | 1.600 | 4.960 | 3,100 | 1.600 | 3.200 | 2,000 |
| Cruzeiro do Oeste | -23,7850 | -53,0730 | 3.200 | 8.320 | 2,800 | 4.200 | 8.400 | 2,000 | 5.200 | 10.400 | 2,000 |

Continua...

| Municípios | Latitude | Longitude | Safras | | | | | | | | |
|----------------------|----------|-----------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| | | | 2002/2003 | | | 2003/2004 | | | 2004/2005 | | |
| | | | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) |
| Diamante do Sul | -25,0430 | -52,6800 | 350 | 1.050 | 3,000 | 500 | 1.150 | 2,300 | 270 | 49 | 0,180 |
| Diamante d'Oeste | -24,9430 | -54,1030 | 3.400 | 11.220 | 3,470 | 3.750 | 7.875 | 2,100 | 800 | 1.600 | 2,000 |
| Espigão A. do Iguaçu | -25,4240 | -52,8360 | 3.800 | 12.160 | 3,200 | 6.300 | 17.010 | 2,700 | 7.900 | 22.989 | 2,910 |
| Farol | -24,1000 | -52,6230 | 20.000 | 64.000 | 3,100 | 21.000 | 57.750 | 2,750 | 21.000 | 46.830 | 2,230 |
| Formosa do Oeste | -24,2930 | -53,3130 | 12.200 | 34.770 | 2,850 | 12.600 | 25.654 | 2,036 | 12.600 | 29.610 | 2,350 |
| Francisco Alves | -24,0660 | -53,8480 | 9.000 | 27.000 | 2,950 | 15.000 | 30.000 | 2,000 | 16.000 | 48.000 | 3,000 |
| Goioerê | -24,1850 | -53,0280 | 26.500 | 80.163 | 3,050 | 28.000 | 70.560 | 2,520 | 28.000 | 54.152 | 1,934 |
| Guaraniaçu | -25,1010 | -52,8780 | 11.500 | 38.065 | 3,310 | 17.300 | 47.575 | 2,750 | 18.500 | 44.400 | 2,400 |
| Ibema | -25,1060 | -53,0120 | 4.600 | 13.340 | 2,900 | 5.120 | 13.906 | 2,716 | 5.600 | 15.288 | 2,730 |
| Iguatu | -24,7170 | -53,0840 | 5.200 | 16.640 | 3,200 | 6.000 | 19.338 | 3,223 | 6.000 | 16.800 | 2,800 |
| Iporã | -24,0030 | -53,7040 | 9.000 | 26.100 | 2,900 | 12.600 | 20.160 | 1,600 | 14.100 | 32.430 | 2,300 |
| Iracema do Oeste | -24,4280 | -53,3550 | 6.200 | 16.740 | 2,700 | 6.400 | 14.278 | 2,231 | 6.530 | 14.497 | 2,220 |
| Iretama | -24,4240 | -52,1060 | 4.650 | 13.950 | 3,000 | 4.700 | 12.220 | 2,600 | 5.500 | 16.225 | 2,950 |
| Janiópolis | -24,1420 | -52,7820 | 23.480 | 68.914 | 2,935 | 26.000 | 67.600 | 2,600 | 27.000 | 63.585 | 2,355 |
| Jesuítas | -24,3850 | -53,3880 | 11.000 | 31.900 | 2,900 | 11.000 | 24.530 | 2,230 | 11.200 | 26.880 | 2,400 |
| Juranda | -24,4200 | -52,8430 | 26.000 | 80.574 | 3,099 | 27.000 | 73.629 | 2,727 | 27.000 | 70.200 | 2,600 |
| Laranjal | -24,8870 | -52,4690 | 450 | 1.170 | 2,600 | 700 | 1.995 | 2,850 | 1.100 | 2.475 | 2,250 |
| Laranjeiras do Sul | -25,4080 | -52,4160 | 7.500 | 23.250 | 3,100 | 9.890 | 24.231 | 2,450 | 11.500 | 21.850 | 1,900 |
| Lindoeste | -25,2600 | -53,5760 | 3.000 | 8.400 | 2,800 | 2.000 | 5.760 | 2,880 | 3.400 | 7.752 | 2,280 |
| Luiziana | -24,2860 | -52,2760 | 39.000 | 125.697 | 3,223 | 40.000 | 124.000 | 3,100 | 41.300 | 111.180 | 2,692 |
| Mamborê | -24,3190 | -52,5300 | 54.000 | 167.400 | 3,100 | 54.000 | 156.600 | 2,900 | 54.000 | 143.100 | 2,650 |
| Mariluz | -24,0020 | -53,1460 | 12.700 | 31.750 | 2,500 | 15.000 | 33.000 | 2,200 | 16.000 | 33.280 | 2,080 |
| Maripá | -24,4180 | -53,8300 | 21.000 | 60.480 | 2,880 | 21.500 | 45.150 | 2,100 | 21.400 | 60.476 | 2,826 |
| Marquinho | -25,1130 | -52,2540 | 980 | 2.940 | 3,000 | 1.800 | 3.960 | 2,200 | 3.600 | 6.480 | 1,800 |
| Mato Rico | -24,7050 | -52,1460 | 3.500 | 11.200 | 3,200 | 3.500 | 9.800 | 2,800 | 4.630 | 9.955 | 2,150 |
| Moreira Sales | -24,0620 | -53,0070 | 10.250 | 27.952 | 2,727 | 14.000 | 32.970 | 2,355 | 15.500 | 32.550 | 2,100 |
| Nova Aurora | -24,5290 | -53,2560 | 29.000 | 64.815 | 2,235 | 30.000 | 78.090 | 2,603 | 30.350 | 72.840 | 2,400 |
| Nova Cantu | -24,6730 | -52,5690 | 18.000 | 55.800 | 3,100 | 18.200 | 49.631 | 2,727 | 18.500 | 48.156 | 2,603 |

Continua...

| Municípios | Latitude | Longitude | Safras | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-----------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| | | | 2002/2003 | | | 2003/2004 | | | 2004/2005 | | |
| | | | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) | Área (ha) | Prod. (t) | Rend. (t/ha) |
| Nova Laranjeiras | -25,3070 | -52,5410 | 3.200 | 9.600 | 3,000 | 4.500 | 10.800 | 2,400 | 6.300 | 12.600 | 2,000 |
| Nova Santa Rosa | -24,4660 | -53,9530 | 12.400 | 36.828 | 2,600 | 12.450 | 28.635 | 2,300 | 12.650 | 41.745 | 3,300 |
| Ouro Verde do Oeste | -24,8050 | -53,9030 | 11.240 | 33.720 | 3,000 | 12.700 | 31.496 | 2,480 | 12.795 | 33.011 | 2,580 |
| Palmital | -24,8930 | -52,2030 | 1.950 | 5.070 | 2,600 | 1.900 | 4.750 | 2,500 | 2.100 | 4.935 | 2,350 |
| Palotina | -24,2840 | -53,8400 | 43.100 | 129.300 | 3,000 | 43.300 | 95.260 | 2,200 | 43.500 | 134.850 | 3,100 |
| Peabiru | -23,9130 | -52,3430 | 25.000 | 78.000 | 3,120 | 25.500 | 84.150 | 3,300 | 28.300 | 67.920 | 2,400 |
| Perobal | -23,8960 | -53,4100 | 3.630 | 9.801 | 2,700 | 7.240 | 15.204 | 2,100 | 9.050 | 22.625 | 2,500 |
| Pérola | -23,8050 | -53,6840 | 370 | 1.110 | 3,000 | 700 | 700 | 1,000 | 715 | 1.650 | 2,308 |
| Quarto Centenário | -24,2790 | -53,0760 | 22.000 | 69.806 | 3,173 | 21.342 | 50.260 | 2,355 | 25.000 | 48.750 | 1,950 |
| Quatro Pontes | -24,5750 | -53,9770 | 8.650 | 30.275 | 3,500 | 9.150 | 21.548 | 2,355 | 9.225 | 28.598 | 3,100 |
| Ramilândia | -25,1200 | -54,0250 | 2.250 | 7.252 | 3,223 | 4.000 | 7.436 | 1,859 | 4.250 | 10.413 | 2,450 |
| Rancho A. d'Oeste | -24,3070 | -52,9540 | 15.505 | 47.445 | 3,060 | 15.400 | 40.040 | 2,600 | 18.000 | 46.800 | 2,600 |
| Roncador | -24,6030 | -52,2750 | 16.000 | 51.200 | 3,200 | 16.500 | 51.150 | 3,100 | 20.000 | 56.000 | 2,800 |
| Santa T. do Oeste | -25,0520 | -53,6330 | 18.348 | 63.662 | 3,470 | 19.000 | 58.900 | 3,100 | 19.000 | 51.813 | 2,727 |
| São Pedro do Iguaçu | -24,9360 | -53,8550 | 13.300 | 44.555 | 3,350 | 13.500 | 38.475 | 2,850 | 13.900 | 37.808 | 2,720 |
| Toledo | -24,7140 | -53,7430 | 67.000 | 232.490 | 2,250 | 68.600 | 164.640 | 2,400 | 69.300 | 188.496 | 2,720 |
| Tuneiras do Oeste | -23,8710 | -52,8760 | 12.500 | 32.500 | 3,200 | 15.000 | 33.000 | 2,200 | 15.000 | 30.000 | 2,000 |
| Tupãssi | -24,5880 | -53,5120 | 22.200 | 71.040 | 2,700 | 22.500 | 54.000 | 2,400 | 22.500 | 60.750 | 2,700 |
| Ubiratã | -24,5450 | -52,9880 | 51.000 | 158.100 | 2,300 | 51.200 | 143.360 | 2,800 | 51.400 | 140.168 | 2,727 |
| Umuarama | -23,7660 | -53,3250 | 6.500 | 14.950 | 2,800 | 10.000 | 13.000 | 1,300 | 15.000 | 27.000 | 1,800 |
| Vera Cruz do Oeste | -25,0580 | -53,8770 | 15.800 | 57.700 | 3,200 | 15.900 | 36.570 | 2,300 | 19.000 | 49.932 | 2,628 |
| Xambrê | -23,7360 | -53,4900 | 810 | 1.944 | 2,400 | 2.700 | 3.348 | 1,240 | 1.960 | 3.528 | 1,800 |

Fontes: SEAB/DERAL e IBGE.