

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PERFIS TEMPORAIS NDVI E SUA RELAÇÃO COM
DIFERENTES TIPOS DE CICLOS VEGETATIVOS
DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

FERNANDO LUIZ PROCHNOW RAMME

CAMPINAS, SP
DEZEMBRO DE 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PERFIS TEMPORAIS NDVI E SUA RELAÇÃO COM
DIFERENTES TIPOS DE CICLOS VEGETATIVOS
DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola** na área de concentração em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

FERNANDO LUIZ PROCHNOW RAMME

Orientador: Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli

Co-Orientador: Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha

CAMPINAS, SP
DEZEMBRO DE 2008

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

R146p Ramme, Fernando Luiz Prochnow
Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar / Fernando Luiz Prochnow Ramme.--Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Rubens Augusto Camargo Lamparelli, Jansle Vieira Rocha.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Processamento de imagens. 2. Sensoriamento remoto. 3. Cana-de-açúcar. 4. Agricultura – Estimativa de rendimento. 5. Sistema de informação geográfica. I. Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. II. Rocha, Jansle Vieira. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: NDVI temporal profiles and their relation with different types of sugarcane vegetative cycles

Palavras-chave em Inglês: MODIS, Spectral curves, Crop yield forecasting, Vegetation index

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Flávio Jorge Ponzoni, Maurício dos Santos Simões, Cláudia Maria Bauzer Medeiros, Giampaolo Queiroz Pellegrino

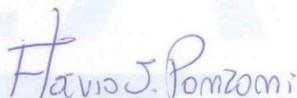
Data da defesa: 15/12/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

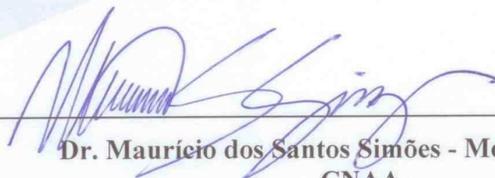
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Fernando Luiz Prochnow Ramme**, aprovada pela Comissão Julgadora em 15 de dezembro de 2008, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



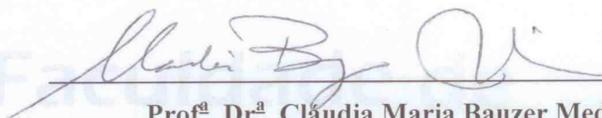
**Prof. Dr. Rubens Augusto Camargo Lamparelli – Presidente e Orientador
Cepagri-Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Flávio Jorge Ponzoni - Membro Titular
INPE**



**Dr. Maurício dos Santos Simões - Membro Titular
CNAA**



**Prof.ª Dr.ª Cláudia Maria Bauzer Medeiros - Membro Titular
IC/Unicamp**



**Dr. Giampaolo Queiroz Pellegrino - Membro Titular
Embrapa/CNPTIA**

AGRADECIMENTOS

A Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI) pela infra-estrutura e auxílio para a formulação deste trabalho.

Aos Professores Dr. Rubens Augusto de Camargo Lamparelli e Dr. Jansle Vieira Rocha, pela orientação e co-orientação na elaboração e conclusão desta tese.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) na pessoa de Hermógenes Moura Machado e Francisco Donzelli, pela disponibilização de dados utilizados nesta tese.

Ao Mestre Fernando Aparecido Benvenuti, por compartilhar sua experiência na cultura da cana-de-açúcar no decorrer desta tese.

Ao Professor Dr. Ricardo da Silva Torres, por compartilhar sua experiência em processamento de imagens no decorrer desta tese.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na pessoa do Dr. Yosio Edemir Shimabukuro, por compartilhar sua experiência sobre o sensor remoto orbital MODIS.

Ao Dr. Júlio César Dalla Mora Esquerdo e Dr. Erivelto Mercante, por participarem de discussões durante a realização deste trabalho.

Ao amigo Dr. Anderson Faustino da Silva, por participar de mais uma grande realização em minha vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
RESUMO.....	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 HIPÓTESE.....	3
1.3 OBJETIVO GERAL	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	5
2.1.1 <i>A cana-de-açúcar em São Paulo</i>	5
2.1.2 <i>Morfologia da Planta</i>	6
2.1.3 <i>A fenologia da planta</i>	8
2.2 GEOPROCESSAMENTO E BANCOS DE DADOS GEOGRÁFICOS	14
2.2.1 <i>Modelagem Dinâmica</i>	14
2.2.2 <i>Sistemas de Informação Geográfica</i>	16
2.3 O SENSORIAMENTO REMOTO	18
2.3.1 <i>Fundamentos Teóricos</i>	18
2.3.2 <i>O sensor remoto orbital MODIS</i>	19
2.3.3 <i>O comportamento espectral de culturas agrícolas</i>	23
2.3.4 <i>O índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI</i>	24
2.3.5 <i>O NDVI para estudos multitemporais</i>	25
2.3.6 <i>Os filtros aplicados à dinâmica das curvas do NDVI</i>	26
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAL	29
3.1.1 <i>Áreas de estudo: localização e caracterização</i>	29
3.1.2 <i>Informações cartográficas</i>	30

3.1.3	<i>Informações de sensoriamento remoto</i>	30
3.1.4	<i>Programas computacionais</i>	31
3.1.5	<i>Dados das fazendas de cana-de-açúcar</i>	31
3.1.6	<i>Dados de Precipitação</i>	34
3.2	METODOLOGIA	36
3.2.1	<i>Introdução</i>	36
3.2.2	<i>Fase 1 – Construção do banco de dados referente aos dados da Usina</i>	38
3.2.3	<i>Fase 2 – Construção do banco de dados referente aos dados da Região</i>	42
3.2.4	<i>Fase 3 – Construção do banco de dados referente aos dados dos Pixels</i>	48
3.2.5	<i>Fase 4 – Filtragem dos dados do perfil temporal do NDVI</i>	52
3.2.6	<i>Fase 5 – Construção das formas de curvas do perfil temporal do NDVI</i>	55
3.2.7	<i>Fase 6 – Interpretação e avaliação das formas de curvas do perfil temporal do NDVI</i>	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	INTRODUÇÃO	63
4.2	FORMAS DE CURVAS EM PERFIS TEMPORAIS DO NDVI MODIS DE MATURAÇÃO PRECOCE	64
4.3	FORMAS DE CURVAS EM PERFIS TEMPORAIS DO NDVI MODIS DE MATURAÇÃO MÉDIA	69
4.4	FORMAS DE CURVAS EM PERFIS TEMPORAIS DO NDVI MODIS DE MATURAÇÃO TARDIA	72
4.5	CONSTATAÇÕES NAS FORMAS DE CURVAS EM PERFIS TEMPORAIS DO NDVI MODIS 77	
4.5.1	<i>Diferentes maturações são caracterizadas por diferentes formas de curvas</i>	77
4.5.2	<i>Maturações iguais, períodos de rebrota e corte semelhantes, e produtividades semelhantes, são caracterizadas por semelhantes formas de curvas</i>	77
5	CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	79
5.1	CONCLUSÕES	79
5.2	CONTRIBUIÇÕES	79
6	TRABALHOS FUTUROS	81

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO A – REGIÕES MONITORADAS NO TRABALHO.....	89
ANEXO B – BANCOS DE DADOS DESENVOLVIDOS PARA O TRABALHO	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1: PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NAS DIFERENTES REGIÕES DO BRASIL	2
FIGURA 1-2: EVOLUÇÃO DO PREÇO (U\$) MÉDIO DO BARRIL DE ÓLEO CRU NO PERÍODO DE JULHO/2005 À JULHO/2008	3
FIGURA 2-1: ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DO CANAVIAL (CANA-SOCA) EM CONDIÇÕES DE CLIMA E MANEJO TÍPICOS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO	6
FIGURA 2-2: UM COLMO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	7
FIGURA 2-3: FASES DA CANA-SOCA PROPOSTAS NESTE TRABALHO	10
FIGURA 2-4: FASE DE ESTABELECIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR	11
FIGURA 2-5: FASE DE PERFILHAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR	12
FIGURA 2-6: FASE DE FORMAÇÃO DOS COLMOS DA CANA-DE-AÇÚCAR	13
FIGURA 2-7: REPRESENTAÇÃO DE UMA ESTRUTURA MATRICIAL	19
FIGURA 2-8: ARQUITETURA DE PROCESSAMENTO DE DADOS MODIS E PRODUTOS.....	21
FIGURA 2-9: MODIS SINUSOIDAL GRID	22
FIGURA 2-10: REFLETÂNCIA DA VEGETAÇÃO	23
FIGURA 2-11: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS FILTROS MÉDIA MÓVEL E SAVITZKY-GOLAY	28
FIGURA 3-1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DO TRABALHO	29
FIGURA 3-2: DISPONIBILIDADE TEMPORAL DAS IMAGENS MODIS.....	30
FIGURA 3-3: DADOS DE PRODUTIVIDADE EM TON/HA SOBRE AS REGIÕES MONITORADAS NO TRABALHO	33
FIGURA 3-4: ESTÁGIO DE CORTE DAS MICRO-REGIÕES NA SAFRA 2005/2006	34
FIGURA 3-5: PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL DA REGIÃO EM ESTUDO.....	35
FIGURA 3-6: FASES DO TRABALHO.....	36
FIGURA 3-8: ESTRUTURA DE ARMAZENAMENTO DOS DADOS DO TRABALHO NOS BANCO DE DADOS	38
FIGURA 3-9: EXEMPLO DE TRATAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS DA USINA	40
FIGURA 3-10: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TMATURACAO</i>	40
FIGURA 3-11: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TVARIEDADE</i>	40
FIGURA 3-12: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TSOLO</i>	41

FIGURA 3-13: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TCULTURA</i>	41
FIGURA 3-14: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TAMBIENTE</i>	41
FIGURA 3-15: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TFAZENDA</i>	41
FIGURA 3-16: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TCORTEHISTORICO</i>	41
FIGURA 3-17: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TTALHAO</i>	42
FIGURA 3-18: CRITÉRIO DE SELEÇÃO DOS PIXELS EM UMA MICRO-REGIÃO.....	43
FIGURA 3-19: VISÃO ESPACIAL DAS MICRO-REGIÕES MONITORADAS NO TRABALHO	43
FIGURA 3-20: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TESTADO</i>	45
FIGURA 3-21: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TMUNICIPIO</i>	45
FIGURA 3-22: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TPRODUTOSIG</i>	45
FIGURA 3-23: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TRECORTE</i>	45
FIGURA 3-24: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TPIXELLOCAL</i>	45
FIGURA 3-25: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TMICROREGIAO</i>	46
FIGURA 3-26: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TMICROREGIAO_TPRODUTOSIG</i> .	46
FIGURA 3-27: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TMICROREGIAO_TTALHAO</i>	46
FIGURA 3-28: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TIMAGEM</i>	51
FIGURA 3-29: EXEMPLO DE DADOS ARMAZENADOS NA TABELA <i>TIMAGEM_QC</i>	51
FIGURA 3-30: ETAPAS REALIZADAS NA SUAVIZAÇÃO DE RUÍDOS PRESENTES NO PERFIL TEMPORAL DO NDVI NA RESOLUÇÃO TEMPORAL DE OITO DIAS	54
FIGURA 3-31: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI PARA UM PLANTIO DE CANA- DE-AÇÚCAR EM DUAS SAFRAS CONSECUTIVAS.....	55
FIGURA 3-32: ARQUITETURA DO SOFTWARE PARA A EXIBIÇÃO GRÁFICA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI MODIS	56
FIGURA 3-33: COMPARAÇÃO DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI MODIS, MATURAÇÃO PRECOCE, REGIÃO 02.....	59
FIGURA 3-34: COMPARAÇÃO DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI MODIS, MATURAÇÃO MÉDIA, REGIÃO 01	59
FIGURA 3-35: COMPARAÇÃO DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI MODIS, MATURAÇÃO TARDIA, REGIÃO 03.....	59
FIGURA 3-36: VISÃO SIMPLIFICADA DAS JANELAS DE MONITORAMENTO DA CANA-SOCA NAS MATURAÇÕES PRECOCE, MÉDIA E TARDIA	59

FIGURA 3-37: JANELAS DE MONITORAMENTO DA CANA-SOCA NAS MATURAÇÕES PRECOCE, MÉDIA E TARDIA	60
FIGURA 4-1: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 2	64
FIGURA 4-2: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 8	65
FIGURA 4-3: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÕES 2 E 8	66
FIGURA 4-4: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 7	67
FIGURA 4-5: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÕES 7 E 8	68
FIGURA 4-6: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 1	69
FIGURA 4-7: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 10	70
FIGURA 4-8: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÕES 1 E 10	71
FIGURA 4-9: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 3	72
FIGURA 4-10: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 5	73
FIGURA 4-11: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÕES 3 E 5	74
FIGURA 4-12: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÃO 4	75
FIGURA 4-13: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÕES 6 E 9	76
FIGURA 4-14: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, A) MATURAÇÃO PRECOCE, B) MATURAÇÃO MÉDIA, C) MATURAÇÃO TARDIA	77
FIGURA 4-15: FORMA DE CURVA DO PERFIL TEMPORAL DO NDVI, MICRO-REGIÕES 3 E 5	77

RESUMO

O objetivo do trabalho foi avaliar a relação entre as fases do crescimento da cana-de-açúcar com as formas de curvas do perfil temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI, obtidas a partir do sensor remoto orbital *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS, na região de estudo. A avaliação desta relação é realizada utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto para a geração do perfil temporal do NDVI, ao longo do ciclo de desenvolvimento fenológico da cana-soca, nas maturações Precoce, Média e Tardia. Os talhões de cana-soca analisados foram agrupados de acordo com a variedade, solo, data de plantio e corte, e contigüidade. A visualização gráfica das formas de curvas analisadas é realizada através de aplicativo, desenvolvido neste trabalho na linguagem de programação *Java*, e do sistema gerenciador de banco de dados *PostgreSQL*. O aplicativo realiza a filtragem de ruídos presentes nas imagens, composição na resolução temporal de 8 dias, através dos dados da banda de controle de qualidade do produto MOD09Q1, realiza a eliminação de valores discrepantes ao longo do perfil temporal do NDVI para a safra analisada, corrige as influências dos períodos de corte e rebrota da cana-soca, e propicia a suavização da forma de curva através do filtro *Savitzky-Golay*. Três janelas temporais de monitoramento da cultura são apresentadas neste trabalho. Cada janela temporal é determinada em função do tipo de maturação da cultura, do coeficiente de cultura (K_c) ao longo do ciclo fenológico da cana-soca e do comportamento na evolução do perfil temporal do NDVI. Concluiu-se que na região de estudo, diferentes maturações são caracterizadas por diferentes formas de curvas do perfil temporal do NDVI.

Palavras-chave: MODIS, curvas espectrais, estimativa de safra, índice de vegetação.

NDVI temporal profiles and their relation with different types of sugarcane vegetative cycles

ABSTRACT

The objective of the work was to evaluate the relationship among the phases of the growth of the sugarcane with the forms of curves of the Normalized Difference Vegetation Index – NDVI temporal profile, obtained from remote sensor orbital *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer* - MODIS, in the study area. The evaluation of this relationship is accomplished by using of the techniques of remote sensing to generate the NDVI profile, along the phenological development phase of stubble-cane, in the Early, Medium and Late maturations. The fields of stubble-cane analyzed were contained in agreement with the variety, soil, planting date and cut, and proximity. The graphic visualization of curves shape analyzed is accomplished through application, developed in this work in the Java programming language, and of the PostgreSQL system database manager. The application accomplishes the filtering of present noises in the images, composition in the temporal resolution of 8 days, through the data of the band of quality control of the MOD09Q1 product, accomplishes the elimination of outliers along the NDVI temporal profile for the culture analyzed, corrects the influences of the cut periods and regrowth of the stubble-cane, and propitiates the smoothing in the curve shape through the filter Savitzky-Golay. Three temporal windows of culture monitoring are presented in this work. Each temporal window is determined in function of the type of crop maturation, of the culture coefficient (Kc) along the phenological development phase of stubble-cane and of the behavior in the evolution of the NDVI profile. It concluded that in the study area, different maturations are characterized by different forms of NDVI profile curves.

Keywords: MODIS, spectral curves, crop yield forecasting, vegetation index.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial da cultura da cana-de-açúcar. A estimativa da produção nacional de cana-de-açúcar na safra 2007/2008 (conforme terceiro levantamento realizado em Novembro de 2007 pela CONAB) destinada à indústria sucroalcooleira é de 475,07 milhões de toneladas, das quais 53,0% são para a produção de álcool (CONAB, 2008).

As estimativas de produção de cana-de-açúcar nas diferentes regiões do Brasil nas safras 2006/2007 e 2007/2008 são ilustradas na Figura 1-1. Na região Sudeste ocorreu aumento de produção de aproximadamente 13%, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor nacional com aproximadamente 67,5% da produção total do Brasil (CONAB, 2008). Na região Nordeste ocorreu aumento de produção de aproximadamente 16%, destacando-se o Estado de Alagoas (CONAB, 2008). Na região Centro-Oeste ocorreu aumento de produção de aproximadamente 22%, destacando-se o Estado de Goiás (CONAB, 2008). Na região Sul ocorreu aumento de produção de aproximadamente 34%, destacando-se o Estado do Paraná (CONAB, 2008). Na região Norte ocorreu aumento de produção de aproximadamente 13,5%, destacando-se o Estado do Amazonas (CONAB, 2008).

A retomada da importância do etanol na matriz brasileira de combustíveis teve início a partir do ano de 2003 com o lançamento dos veículos *flex-fuel*, em meio à nova alta dos preços do petróleo e ao interesse dos países desenvolvidos em soluções que minimizem o impacto poluidor dos veículos automotores na atmosfera (Camargo et al., 2008). A partir de 2005, o preço internacional do petróleo (do qual se obtém o combustível gasolina) elevou-se sensivelmente, passando de 62 dólares (valor médio aproximado) por barril de óleo cru em Julho de 2005 para 140 dólares (valor médio aproximado) por barril de óleo cru, em Julho de 2008 (NYMEX, 2008), conforme ilustrado na Figura 1-2. Em função disto e agregado a uma conjunção de fatores extremamente favoráveis tais como menor custo de produção do combustível álcool etílico (etanol) e o efeito do protocolo de *Kyoto* como resultado da

preocupação mundial sobre a preservação ambiental e conseqüente busca por alternativas de energia renovável, cria-se uma perspectiva favorável ao aumento da produção da cultura da cana-de-açúcar nos próximos anos.

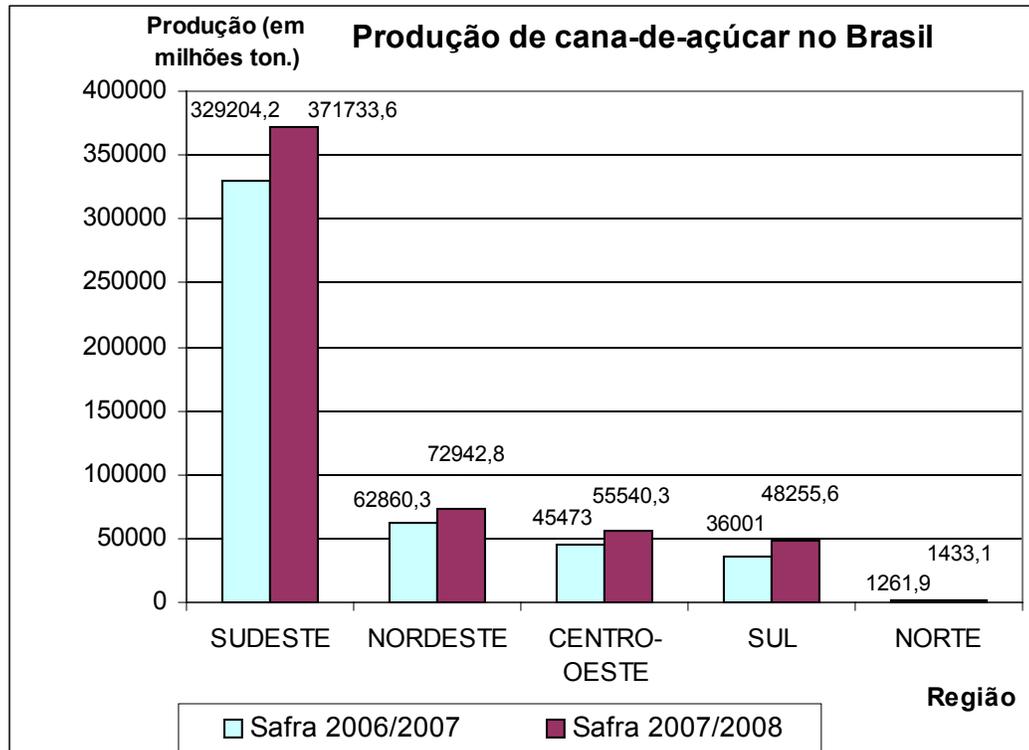


Figura 1-1: Produção de cana-de-açúcar nas diferentes regiões do Brasil
 Fonte: CONAB, 2008

Para o Brasil, os benefícios econômicos do uso do etanol são, para os economistas, a redução da dependência do mercado externo de combustíveis a base de petróleo, a disponibilidade de grandes áreas de terras nos trópicos com clima e solo favoráveis a produção da cultura de cana-de-açúcar e o domínio da tecnologia de produção da cultura de cana-de-açúcar e do etanol, ficando em posição favorável à exportação do combustível álcool etílico. Contudo, existem problemas referentes a necessidade de estimativa de quando realizar a colheita de forma a conciliar alta produtividade agrícola com elevado teor de sacarose e preços favoráveis, que precisam ser resolvidos para que o etanol torne-se realmente uma alternativa comercial.

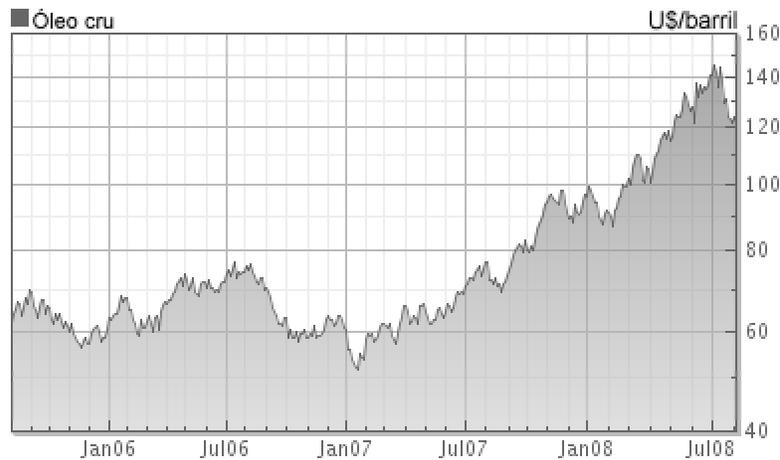


Figura 1-2: Evolução do preço (US) médio do barril de óleo cru no período de Julho/2005 à Julho/2008

Fonte: New York Mercantile Exchange (NYMEX), 2008

Em função da importância crescente da cana-de-açúcar e como a cultura é plantada em grandes extensões de terra, o uso do sensoriamento remoto passa a ser uma ferramenta interessante devido ao baixo custo associado a aquisição gratuita das imagens para apoiar a realização do monitoramento ágil da cultura através da evolução temporal do perfil do NDVI da cultura obtido das imagens de satélite da superfície da Terra. Este trabalho apresenta uma metodologia para o setor sucroalcooleiro empregar no monitoramento da cultura da cana-de-açúcar através de sensoriamento remoto.

1.2 Hipótese

A hipótese investigada neste trabalho é que existe correlação significativa das formas de curvas do perfil temporal do índice de vegetação *NDVI - Normalized Difference Vegetation Index*, com o ciclo vegetativo na cana-soca.

1.3 Objetivo geral

O objetivo do trabalho foi avaliar a relação entre as fases do crescimento da cana-de-açúcar com as formas de curvas do perfil temporal do NDVI nas maturações Precoce, Média e Tardia, obtidas a partir do sensor remoto orbital *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS*, na região de estudo.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum*. Segundo Lucchesi (2001), atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada predominantemente em regiões subtropicais entre 15° e 30° de latitude, mas pode chegar até 35° de latitude.

No Brasil, até 1925, a agroindústria açucareira foi sustentada pelas variedades “nobres” ou “tropicais” (*Saccharum officinarum* L.). Devido à incidência de doenças, essas variedades foram substituídas por espécies híbridas (*Saccharum spp.*) o que garante maior resistência e capacidade de adaptação às condições ambientais encontradas, por exemplo, nas áreas de expansão da fronteira agrícola. Outra importante característica das variedades atuais está na existência de espécies com o ciclo de crescimento e estágio de maturação adaptados às diversas características do ambiente, o que permite maior qualidade de matéria prima durante todo o período da safra.

2.1.1 A cana-de-açúcar em São Paulo

O crescimento vegetativo da cana-de-açúcar é variável e depende principalmente da época de plantio. A época de plantio está correlacionada à condição climática em que se dará o crescimento. Por exemplo, uma cana plantada em abril passará todo o inverno com crescimento lento para depois aproveitar as condições climáticas favoráveis (calor e umidade) para o período de grande crescimento. Experimentos sob condições controladas mostraram que a relação linear entre a produção de matéria seca e o consumo de água pela cana-de-açúcar, é afetada significativamente pela temperatura ou pelo estágio de crescimento da planta (Castro, 2000). Canas cultivadas com maior intensidade de luz têm os colmos mais grossos e mais retos, as folhas mais largas, mais grossas e mais verdes, as raízes mais desenvolvidas, uma matéria seca maior e menos água em sua constituição.

O manejo da cultura é formado por diversos cortes. No período entre o plantio e o primeiro corte recebe o nome de cana-planta. O ciclo da cana-planta tem duração entre 12 e 18 meses, variando em função da época do plantio. Após o primeiro corte a rebrota da cana recebe o nome de cana-soca e passa a ter o ciclo médio de 12 meses (Figura 2-1). A cultura é renovada a cada 10 anos, podendo este período ser reduzido dependendo principalmente das condições edafoclimáticas, pragas e sistema de colheira da área em que está sendo cultivada.



Figura 2-1: Estádios fenológicos do canavial (cana-soca) em condições de clima e manejo típicos para o Estado de São Paulo

2.1.2 Morfologia da Planta

2.1.2.1 O Colmo

O colmo é cilíndrico, ereto, fibroso, rico em açúcar e constituído de nó e entrenós, conforme ilustrado na Figura 2-2. Em cada nó existe uma gema. Um corte transversal no colmo mostra uma casca endurecida, a polpa interna mais macia. A casca dos colmos é formada por várias camadas de células lignificadas que protegem os tecidos internos. As células da epiderme muitas vezes contêm pigmentos vermelhos que podem conferir uma coloração avermelhada ao colmo de certos cultivares. Entretanto, a existência de inúmeros cultivares provenientes de trabalhos de melhoramento contribuiu para aumentar a diversidade de formas, comprimentos, diâmetros e cores dos colmos, o mesmo acontecendo com as gemas – suas formas e tamanhos (Lucchesi, 2001).

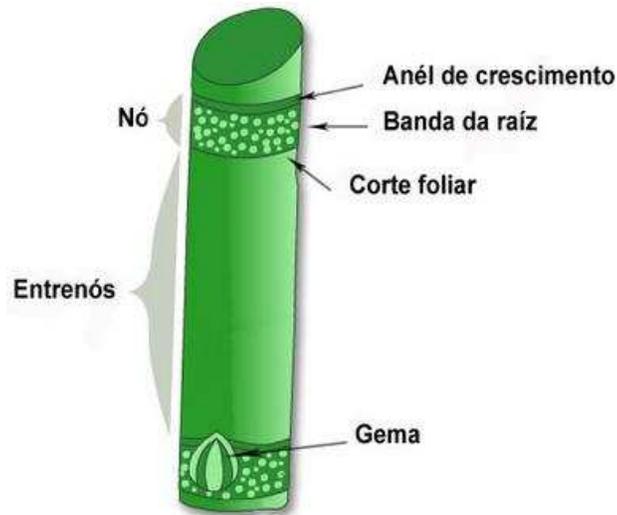


Figura 2-2: Um colmo da cana-de-açúcar
 Fonte: Adaptado de [NETAFIM, 2008]

2.1.2.2 A Folha

Em geral as folhas da cana-de-açúcar são alternas, opostas e fixas aos nós dos colmos, correspondendo uma folha a cada nó, de coloração verde característica, variando a tonalidade de acordo com a região da folha, sua idade e o cultivar. As bainhas são normalmente de cor verde claro, mas a lâmina varia do verde amarelado para verde escuro dependendo da variedade e do estado nutricional da planta. As bordas das folhas são geralmente serrilhadas e as bainhas são freqüentemente cobertas com pêlos dependendo da variedade. Na cana-de-açúcar as folhas estão em contínua renovação até a fase de maturação, as maduras senescendo e novas surgindo. A longevidade das folhas depende dos cultivares e de condições ambientais. O número de folhas por colmo é afetado pelas condições climáticas.

O desenvolvimento das folhas inicia-se após a fase de brotação. As folhas são responsáveis diretas pela transformação da energia solar em energia química através da fotossíntese. Cada colmo produz uma nova folha a cada 10 dias aproximadamente (Glasziou et al., 1965), e devido à senescência e queda das folhas mais velhas observa-se o número praticamente constante, de 8 a 10 folhas por colmo, após o fechamento do dossel (Machado, 1987; Machado, 1981). Segundo Matsuoka (1996), em termos de lavoura, um dos fatores que determinam a produtividade final é a arquitetura do dossel da cultura, dada pela conjunção da

arquitetura de cada planta que a compõe. Assim, a arquitetura do dossel da cultura é resultado da arquitetura da variedade, da densidade populacional e do arranjo espacial das plantas.

2.1.3 A fenologia da planta

O conhecimento das fases de crescimento fenológicas da planta é essencial para maximizar a produção de cana-de-açúcar. Os autores Doorenbos e Kassam (1981), ao avaliarem a influência da umidade relativa no crescimento da cultura da cana-de-açúcar, consideraram quatro períodos de crescimento: 1 – Período de estabelecimento, em que ocorre a brotação dos toletes; 2 – Período vegetativo, em que ocorre o perfilhamento e o início do alongamento dos colmos; 3 – Período de formação de produtividade; e 4 – Período de amadurecimento. Os autores Doorenbos e Kassam (1981) também dividiram os quatro períodos de crescimento em sete estágios, conforme apresentado no Quadro 2-1. No entanto, Doorenbos e Kassam (1981) não discutem as difentes maturações da cultura, precoce, média e tardia, para a cana-planta e para a cana-soca, ao descreverem os valores obtidos para o coeficiente de cultura (Kc). O Kc é um índice desenvolvido para indicar a relação entre a evapotranspiração máxima da cultura em questão e a evapotranspiração de referência, e varia conforme o aumento de área foliar e o estágio de desenvolvimento da cultura.

Períodos de crescimento	Estágios de desenvolvimento da planta	Coefficiente Kc para cana-soca
1 – estabelecimento	(e1) Plantio até 0,25% da cobertura vegetal	0,40 – 0,60
2 – vegetativo	(e2) 0,25% até 0,50% da cobertura vegetal	0,75 – 0,85
	(e3) 0,50% até 0,75% da cobertura vegetal	0,90 – 1,00
3 – formação de produtividade	(e4) 0,75% até a cobertura vegetal	1,00 – 1,20
	(e5) Grande crescimento vegetativo	1,05 – 1,30
4 – amadurecimento	(e6) Início da senescência	0,80 – 1,05
	(e7) Amadurecimento	0,60 – 0,75

Quadro 2-1: Períodos de crescimento da cana-de-açúcar
Fonte: Doorenbos e Kassam (1981)

O ciclo da cana plantada pela primeira vez, isto é, cuja origem se fundamenta na brotação de mudas plantadas e que posteriormente sofrerá o primeiro corte, recebe o nome de ciclo da cana-planta. Após o corte da cana-planta, restam no campo as socas ou soqueiras de cana-de-açúcar. Os colmos industrializáveis da cana-planta sofrem corte o mais basal possível, isto é,

bem próximo à superfície do solo, de forma que restam suas bases ou tocos, que permanecem ligados ao sistema radicular bem desenvolvido, formado pela cana-planta. O ciclo das soqueiras ou ciclo da cana-soca dura 12 meses em média.

Neste trabalho, o desenvolvimento da cana-soca foi separado em quatro fases principais: 1 – Estabelecimento; 2 – Perfilhamento; 3 – Formação dos Colmos; e 4 – Amadurecimento. As fases de crescimento da cana-soca foram divididas em 8 estágios, conforme apresentado no Quadro 2-2 e na Figura 2-3. Esta adaptação foi realizada a fim de considerar as especificidades da cana-soca nas maturações precoce, média e tardia, nas formas de curvas dos perfis temporais do NDVI.

Fases de crescimento	Estágios de desenvolvimento da vegetação
1 – estabelecimento	(e1) Rebrotar até 0,25% da cobertura vegetal
2 – perfilhamento	(e2) 0,25% até 0,50% da cobertura vegetal
	(e3) 0,50% até 0,75% da cobertura vegetal
3 – formação dos colmos	(e4) 0,75% até a cobertura vegetal
	(e5) Grande crescimento vegetativo
	(e6) Crescimento (parte final)
4 – amadurecimento	(e7) Início da senescência
	(e8) Amadurecimento

Quadro 2-2: Fases e estágios de crescimento da cana-soca propostas neste trabalho

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1981)

Durante as fases de estabelecimento, perfilhamento e formação dos colmos no ciclo fenológico da cultura, a disponibilidade de água proporciona um crescimento rápido da cana-de-açúcar, alongamento da planta e formação de entrenós. Porém, durante o período de amadurecimento, muita água não é desejável porque isso leva à baixa qualidade de caldo; e também prejudica a safra e operações de transporte. Um total de água entre 1100 e 1500 mm (Marchiori, 2004) é adequado na cana-soca se a distribuição, frequência e quantidade, for certa durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. O suprimento de água deve ser somente o suficiente para manter o solo úmido com aeração adequada. Portanto, em um cultivo da cana-de-açúcar em crescimento que não recebe água suficientemente, pode haver quebra da cana, redução significativa no peso da cana, aumento do conteúdo de fibra e

deterioração na qualidade do caldo. A situação é agravada mais adiante caso a colheita seja adiada.

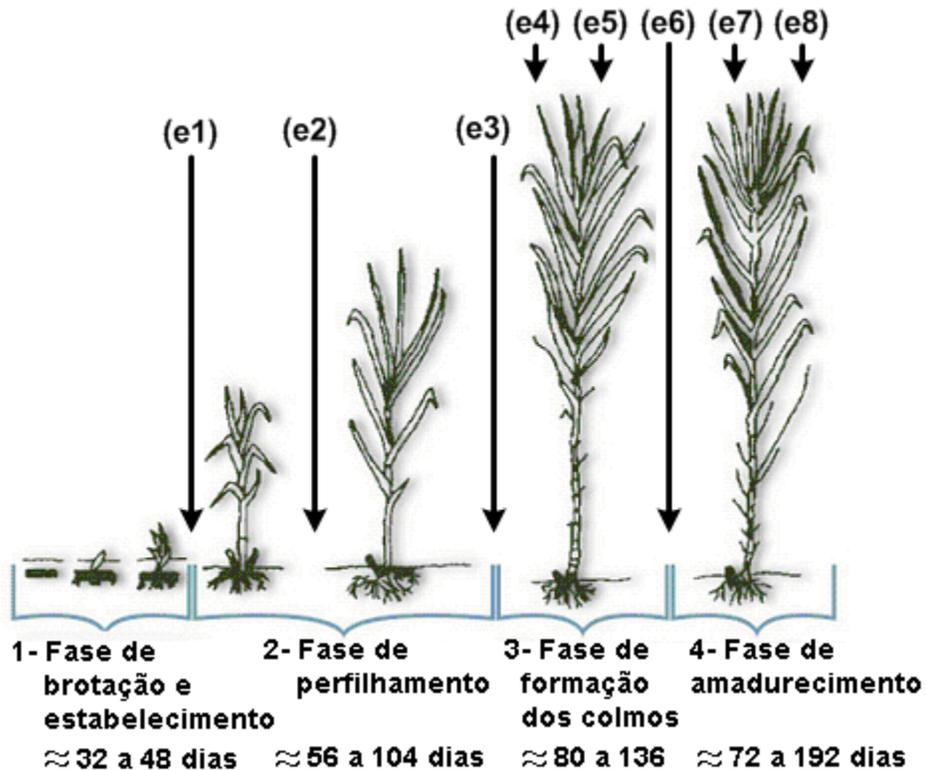


Figura 2-3: Fases da cana-soca propostas neste trabalho
 Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1981)

2.1.3.1 A Fase de Estabelecimento

Na fase inicial do crescimento da cana-de-açúcar, ocorre o estabelecimento da planta, conforme ilustrado na Figura 2-4. Para a cana-planta, a propagação da cana-de-açúcar é feita por meio do plantio dos toletes que fazem parte do colmo. Para a cana-soca, de acordo com Câmara e Oliveira (1993), em torno de 20 a 30 dias após o corte, observa-se profusa brotação das soqueiras. No entrenó, está localizada a gema de onde ocorre a brotação. A emergência da brotação do tolete depende do cultivar, da emergência rápida ou lenta, do estado nutricional do tolete, da dimensão do entrenó, da umidade no tolete, no solo e no ar, da temperatura ótima entre 34 e 37° C, limitante abaixo de 21°C e acima de 44°C, e da aeração do solo -

compactação e drenagem deficientes levam à falta de oxigênio para a respiração das raízes (Castro, 2000).

Durante a fase de estabelecimento da planta, a cultura da cana-de-açúcar requer menos quantidade de água. Nesta fase, a luz e uma boa frequência de água são preferíveis. A quantidade de água em excesso leva ao apodrecimento da gema por falta de aeração, ataque fúngico e redução da temperatura do solo. Portanto, tanto a falta quanto o excesso de água prejudicam a brotação e o estabelecimento da planta, e conseqüentemente isto provocará uma população de colmos menor por área de unidade.



Figura 2-4: Fase de estabelecimento da cana-de-açúcar
Fonte: [NETAFIM, 2008]

2.1.3.2 A Fase de Perfilamento

Como é típico em todas as gramíneas, após a brotação das gemas, o tolete começa a formar outros rebentos que são os perfilhos. Esse processo é denominado de perfilamento (Casagrande, 1991), conforme ilustrado na Figura 2-5. Após este período, inicia-se o desenvolvimento das raízes dos perfilhos primários, posteriormente dos secundários e assim sucessivamente. Na medida em que as raízes vão se desenvolvendo, as raízes de fixação vão perdendo sua função e a cana-planta passa a depender exclusivamente das raízes dos perfilhos. Dependendo das condições meteorológicas e edáficas do solo, em torno de 90 dias, todo o

sistema radicular encontra-se distribuído nos primeiros 30 cm (Casagrande, 1991). O perfilhamento é bastante afetado pelos seguintes fatores: luz, temperatura, água e nutrientes, espaçamento, profundidade do plantio, doenças, pragas e época de plantio. Castro (2000), cita que a intensidade do perfilhamento é variável entre os diferentes cultivares. Os cultivares com maior perfilhamento produzem geralmente colmos mais finos. Alta luminosidade pode promover o número de perfilhos, e ao contrário, baixa luminosidade decorrente de dias nublados reduz o perfilhamento, agravando provavelmente o efeito da competição. Para Lucchesi (2001) uma maior restrição de luminosidade pode sim reduzir o perfilhamento, mas o excesso de luz pode induzir uma foto-destruição de auxinas sintetizadas no topo da planta, reduzindo o alongamento e induzindo a brotação de gemas laterais. De acordo com Câmara e Oliveira (1993) a partir do final do perfilhamento, os colmos mais desenvolvidos continuam os seus crescimentos em altura e espessura. Em Dillewijn (1952), o autor aborda os fatores que influenciam o perfilhamento: luz, temperatura, umidade, fertilizantes, espaçamento, período de plantio. Durante esta fase, a falta de água tende a reduzir a população de colmos (Casagrande, 1991).



Figura 2-5: Fase de perfilhamento da cana-de-açúcar
Fonte: [NETAFIM, 2008]

2.1.3.3 A Fase de Formação dos Colmos

Os colmos que sobreviveram à forte competição da fase de perfilhamento intenso continuam os seus processos de crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus internódios. Após a fase de perfilhamento, inicia-se a fase de formação dos colmos. A medida que os colmos vão amadurecendo, atingindo o seu tamanho final constituindo-se em colmos industrializáveis armazenam, de maneira mais intensa, a sacarose pela fotossíntese.

Durante a fase de formação dos colmos, conforme ilustrado na Figura 2-6, ocorre um grande crescimento vegetativo.



Figura 2-6: Fase de formação dos colmos da cana-de-açúcar
Fonte: [NETAFIM, 2008]

A fase mais crítica para o suprimento de umidade na cana-de-açúcar é durante a formação dos colmos. Nesta fase ocorre um grande crescimento dos colmos, bem como a produção foliar e de tecidos de armazenamento de açúcar. A alta umidade relativa (80% a 85%) favorece alongamento rápido da cana-de-açúcar nesta fase (Casagrande, 1991). O déficit de água nesta fase reduz o raio de alongamento do colmo por causa do encurtamento dos entrenós, resultando em menos peso de cana. Um déficit severo de água durante o último estágio desta fase força a maturação do cultivo.

2.1.3.4 A Fase de Maturação

Na fase final do desenvolvimento da cana-de-açúcar, denominada de maturação, o crescimento é pouco intenso e os produtos da fotossíntese são destinados, principalmente, ao armazenamento da sacarose nos colmos. Castro (2000) observou que a porcentagem de sacarose nos quatro meses antes da colheita aumentou de 4,5 para 13,7 enquanto que a massa dos colmos aumentou somente de 95 para 99 t/ha. É importante salientar que nessa fase além da diminuição da atividade fotossintética, há um acúmulo de matéria seca com grande parte

das folhas entrando em senescência, sendo que a intensidade desses fenômenos depende das condições climáticas.

O ponto de maturação pode ser determinado pelo refratômetro de campo e complementado por análises de laboratório. O refratômetro fornece diretamente a porcentagem de sólidos solúveis do caldo (*brix*). Comercialmente há necessidade de o produtor conciliar alta produtividade agrícola com elevado teor de sacarose na época da colheita. Portanto, a identificação do ponto de maturação de forma que maximize o teor de sacarose da cana, e conseqüentemente a lucratividade do produtor, é desejada.

Na fase de maturação, o suprimento restrito de água ou déficit hídrico ameno, conteúdo de umidade da bainha entre 45% e 65% (Casagrande, 1991), é desejável para amadurecer o cultivo através da redução da proporção de crescimento vegetativo, desidratando a cana e forçando a conversão do total de açúcares para sacarose recuperável. Com a redução do crescimento vegetativo, a proporção entre matéria seca armazenada como sacarose e aquela usada para um novo crescimento aumenta. Por outro lado, um suprimento satisfatório de água leva a um crescimento vegetativo contínuo, ultrapassando o período satisfatório de corte da planta, afetando o processo de acúmulo de açúcar; e quando a planta for seriamente privada de água, isto interromperá o metabolismo da planta e uma perda de conteúdo de açúcar pode ser maior que a formação de açúcar no período satisfatório para a planta.

2.2 Geoprocessamento e Bancos de Dados Geográficos

2.2.1 Modelagem Dinâmica

Historicamente, a tecnologia de geoprocessamento enfatizou a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. Isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em um sistema de informação geográfica (*SIG*) é o mapa. Um *SIG* é um sistema computacional que permite a captura, armazenamento, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados referenciados geograficamente (Worboys e Duckham, 2004). Uma das principais características de um *SIG* é sua capacidade de manipular dados cartográficos e descritivos de forma integrada, provendo uma forma consistente para análise e consulta.

Dados referenciados geograficamente ou, simplesmente, dados georreferenciados, são dados que descrevem fenômenos geográficos cuja localização está associada a uma posição sobre a superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica (Câmara et al., 2004). Um dado georreferenciado é caracterizado pelos seguintes aspectos: 1) descrição do fenômeno geográfico; 2) localização geográfica; 3) relacionamentos espaciais com outros fenômenos geográficos; e 4) instante ou intervalo de tempo em que o fenômeno existe ou é válido (Worboys e Duckham, 2004). Estes aspectos são classificados nas seguintes categorias de dados: 1) dados convencionais, atributos alfanuméricos usados para armazenar os dados descritivos e temporais, como por exemplo a produtividade de um determinado talhão em uma safra; 2) dados espaciais, atributos que descrevem a geometria, a localização geográfica e os relacionamentos espaciais, como por exemplo a localização de um pixel no talhão de cana monitorada; e 3) dados pictóricos, que armazenam imagens sobre regiões geográficas.

Um conjunto significativo de fenômenos espaço-temporais, tais como planejamento urbano, evolução temporal de uma cultura, entre outros, são inerentemente dinâmicos devido a dependência da variável tempo e as representações estáticas comumente utilizadas em SIG não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais dinâmicos. Conceitualmente, pode-se representar o tempo através de diferentes estruturas, definidas, principalmente, com base em três aspectos da representação temporal: granularidade, variação e ordem (Edelweiss e Oliveira, 1994).

A ordem refere-se ao modo como o tempo flui. Neste caso, pode-se assumir que o tempo flui de forma linear, ramificada ou cíclica. No tempo linear considera-se que o tempo flui sequencialmente, ou seja, existe uma ordem de precedência entre os pontos no tempo, de tal forma que cada ponto tenha apenas um sucessor e um antecessor. No tempo ramificado, múltiplos pontos podem ser os sucessores ou antecessores imediatos de um mesmo ponto. O tempo cíclico é utilizado para modelar eventos e processos recorrentes (Edelweiss e Oliveira, 1994). Neste caso, a periodicidade de sua ocorrência faz com que sempre se volte à mesma referência de tempo. Um exemplo é o ciclo anual de produção de mudas de plantas: verão,

período em que coloca-se a sementeira; outono, período em que tira-se a muda; inverno, período em que aduba-se; e primavera, período em que se realiza a poda.

Com relação à variação temporal duas possibilidades podem ser consideradas: tempo contínuo e discreto. Uma variável temporal contínua é usada em processos que ocorrem em medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão. Por exemplo, a evolução do perfil temporal do NDVI MODIS na resolução temporal diária para a cultura da cana-de-açúcar entre dois instantes de tempo medidos, distantes num período de oito dias, pode ser interpolada com base nos valores anteriores e posteriores porque esta cultura não produz variações significativas no NDVI neste período e este processo é contínuo no tempo. Uma variável temporal discreta é usada quando o tempo é determinado em certos pontos ou intervalos e a variação é descontínua entre estes pontos. Uma delimitação de lotes de um cadastro imobiliário pode ocupar uma posição num instante t e outra num instante t' , mas não faz sentido dizer que a delimitação ocupou alguma posição intermediária entre t e t' . A expansão da área de desmatamento de uma floresta localizada num determinado ponto entre dois instantes de tempo medidos é outro exemplo de processo discreto no tempo porque ocorre apenas uma vez.

As diferentes granularidades de um sistema temporal conduzem à definição de instante, intervalo e período de tempo. Um instante de tempo representa um ponto particular no tempo. Um intervalo é o tempo decorrido entre dois instantes. Um período consiste de uma seqüência de intervalos de tempo.

A incorporação da dimensão temporal em um sistema de informação não se restringe apenas à questão da representação do tempo, mas inclui também questões relativas à sua recuperação. Um SIG temporal deve ser capaz de recuperar informações através de consultas definidas sobre critérios temporais, como por exemplo: qual a relação existente entre o formato da curva do índice de vegetação (NDVI) em um determinado talhão na safra 2004/05 e sua produtividade em toneladas de cana por hectare - ton/ha.

2.2.2 Sistemas de Informação Geográfica

Numa visão abrangente, um sistema de informação geográfica (SIG) tem os seguintes componentes: 1) interface com usuário, que define como o sistema é operado e controlado; 2) entrada e integração de dados; 3) funções de processamento gráfico e de imagens; 4)

visualização e plotagem; e 5) armazenamento e recuperação de dados organizados sob a forma de um banco de dados geográficos. Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa estes componentes de forma distinta, mas todos os componentes citados estão presentes num SIG (Câmara et al., 2004).

O projeto e a operação de sistemas de informação geográfica adotando bancos de dados geográficos como ponto central da arquitetura facilitam a realização de consultas a dados geográficos e permitem incorporar a persistência aos dados geográficos. A organização de banco de dados geográficos mais utilizada pelas usinas de cana-de-açúcar é ainda o modelo geo-relacional, constituído de tabelas, para armazenar os atributos dos objetos geográficos. Este modelo distingue-se principalmente pela estratégia adotada para armazenar e recuperar dados espaciais. Arquivos gráficos como por exemplo, o formato vetorial *Shapefile - SHP*, armazenam as representações geométricas destes objetos. Do ponto de vista do usuário, esta organização permite que aplicações convencionais, concebidas e desenvolvidas dentro do ambiente de um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) relacional, tal como o *PostgreSQL*, compartilhem os atributos dos objetos geográficos. Os principais problemas desta arquitetura, onde os atributos ficam armazenados no SGBD e os vetores estão em arquivos externos ao SGBD, são: 1) dificuldade no controle e manipulação das componentes espaciais; 2) dificuldade em manter a integridade entre a componente espacial e a componente alfanumérica; e 3) dificuldade de interoperabilidade, já que cada sistema trabalha com arquivos com formato proprietário.

Um SGBD oferece serviços de armazenamento, de consulta, de atualização e de persistência aos dados. Casanova et al. (2005) apresentam que os principais requisitos de um sistema que sugerem o emprego de um SGBD são: facilidade de uso, correção, facilidade de manutenção, confiabilidade, segurança e desempenho. A modelagem do banco de dados deve refletir a realidade das aplicações e o acesso aos dados deve ser feito de forma simples tal como através da linguagem de consulta estruturada (*SQL*), a qual possibilita recuperar (*select*), incluir (*insert*), atualizar (*update*) e eliminar (*delete*) dados de uma ou mais tabelas. Os dados armazenados no banco de dados devem refletir um estado correto da realidade modelada, incorporando restrições de integridade. Alterações na forma de armazenamento dos dados devem afetar as aplicações o mínimo possível, em que a especificação do banco de dados é

realizada em níveis, isolando os detalhes de armazenamento das aplicações. Atualizações não devem ser perdidas e não devem interferir umas com as outras. O acesso aos dados deve ser controlado de acordo com os níveis de autorização definidos para cada aplicação e com o controle de acesso de cada usuário. O tempo de acesso aos dados deve ser compatível com a complexidade da consulta.

Um banco de dados temporal é aquele que contém dados históricos. Os dados temporais são uma representação codificada de fatos marcados com a sua ocorrência em um determinado período de tempo. A simples representação dos dados em formato tabular não permite que estes sejam persistidos devido a ausência de um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) e portanto, não garante que estes estejam íntegros.

Neste trabalho, foi desenvolvido um aplicativo que implementa os principais componentes de um SIG, com o objetivo de visualização gráfica das formas de curvas dos perfis temporais do NDVI para a cultura da cana-de-açúcar. A organização de banco de dados geográficos adotada neste aplicativo foi o modelo geo-relacional e o *SGBD* utilizado foi o *PostgreSQL*.

2.3 O sensoriamento remoto

2.3.1 Fundamentos Teóricos

Sensoriamento remoto pode ser definido de maneira ampla como a detecção da natureza de um objeto sem que haja contato direto entre o referido objeto e o sistema sensor (Meneses et al., 2001; Curran, 1986; Slater, 1980). Todos os materiais da superfície terrestre com temperatura superior a zero absoluto (0° K), podem emitir, refletir, transmitir ou absorver seletivamente radiação eletromagnética. A energia eletromagnética refletida ou absorvida é captada por um sistema sensor a bordo de satélites orbitais, que por sua vez, geram imagens desses registros.

A imagem digital gerada pelos sistemas sensores é discreta e constituída por um arranjo de elementos (dígitos) sobre a forma de malha ou grade regular (Crosta, 2002). A área de cruzamento entre colunas e linhas dessa malha dá-se o nome de *pixel* (*picture element*). A cada *pixel* é atribuído um valor numérico que indica a intensidade da radiação eletromagnética. Essa intensidade denomina-se nível de cinza (NC) e varia em tonalidades que

vão do preto (nível mínimo) ao branco (nível máximo). A imagem digital é, portanto, uma função bidimensional da intensidade de energia eletromagnética refletida ou emitida pela área imageada, representada por uma matriz $f(x,y)$, onde os valores de f são resultantes da intensidade (brilho) dos materiais da área correspondente ao *pixel* de coordenada (x,y) . A resolução espacial do sistema é dada pela relação entre o tamanho do *pixel* na imagem e a área por ela coberta no terreno, como mostrado na Figura 2-7 (Casanova et al., 2005). Do ponto de vista de sensoriamento remoto, múltiplas bandas espectrais são consideradas no imageamento. Cada banda do sensor é caracterizada por uma faixa do espectro eletromagnético e o resultado do imageamento na banda é armazenado em uma estrutura matricial.

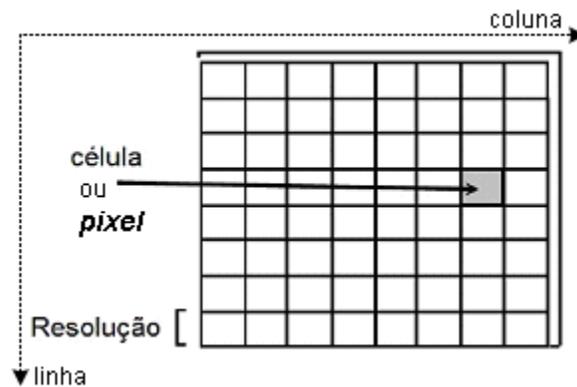


Figura 2-7: Representação de uma estrutura matricial
 Fonte: Casanova et al. (2005)

2.3.2 O sensor remoto orbital MODIS

A alta frequência de aquisição das imagens do sensor remoto orbital *MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, resolução temporal diária, propicia a disponibilidade de um maior número de imagens livres de nuvens, principalmente durante o ciclo das culturas de verão. O sensor MODIS disponibiliza imagens geométrica e radiometricamente corrigidas, provê alta sensibilidade radiométrica (quantização de 12 *bits*) nas 36 bandas espectrais em comprimentos de onda que variam de 400 à 14.400 nm. Neste trabalho foi utilizado as bandas do vermelho e do infravermelho-próximo, imageadas em resolução espacial de 250 x 250 m (6,25 ha). A banda do vermelho corresponde a banda 1 na faixa espectral de 620 à 670 nm e a banda infravermelho-próximo corresponde a banda 2 na faixa espectral de 841 à 876 nm (MODIS/GSFC/NASA, 2005).

Diferentes produtos do sensor MODIS são disponibilizados pela NASA, conforme apresentado no Quadro 2-3. O produto MOD09 associado ao satélite TERRA é processado do nível L1B (Figura 2-8). Este produto é uma estimativa de refletância espectral de superfície, denominado de fator de refletância bidirecional ou simplesmente refletância aparente, corrigida do espalhamento atmosférico e absorção de gases atmosféricos e aerossol. As imagens da série temporal referentes ao escopo deste trabalho são adquiridas da NASA e encontram-se na projeção *Sinusoidal*.

Produto	Principais sub-produtos	Bandas presentes
MOD05	MOD05_L2 – resolução temporal diária	Água precipitável
MOD06	MOD06_L2 – resolução temporal diária	Nuvens
MOD07	MOD07_L2 – resolução temporal diária	Perfil atmosférico
MOD09	MOD09GQK – resolução temporal diária	Refletância aparente no vermelho Refletância aparente no infravermelho-próximo Controle de qualidade
	MOD09Q1 – resolução temporal de 8 dias, pixel de melhor qualidade radiométrica e geométrica	Refletância aparente no vermelho Refletância aparente no infravermelho-próximo Controle de qualidade
MOD13	MOD13Q1 – resolução temporal de 16 dias, pixel de valor máximo do período	<i>NDVI</i> <i>NDVI Quality</i> <i>EVI</i> <i>EVI Quality</i> Refletância aparente no vermelho Refletância aparente no infravermelho-próximo Refletância aparente no infravermelho-médio Refletância aparente no azul Ângulo zenital de visada médio Ângulo solar zenital médio Ângulo de azimute relativo médio
MOD15	MOD15A2 – resolução temporal de 8 dias, pixel de melhor qualidade radiométrica e geométrica	Índice de área foliar / Fração da radiação fotossinteticamente ativa
MOD43	MOD43B1 – resolução temporal de 16 dias	Função de distribuição de refletância bidirecional
MODMGGAD	MODMGGAD – resolução temporal diária	Ângulos de localização geográfica
MODPTQKM	MODPTQKM – resolução temporal diária	Pontos de observação

Quadro 2-3: Principais produtos do sensor MODIS

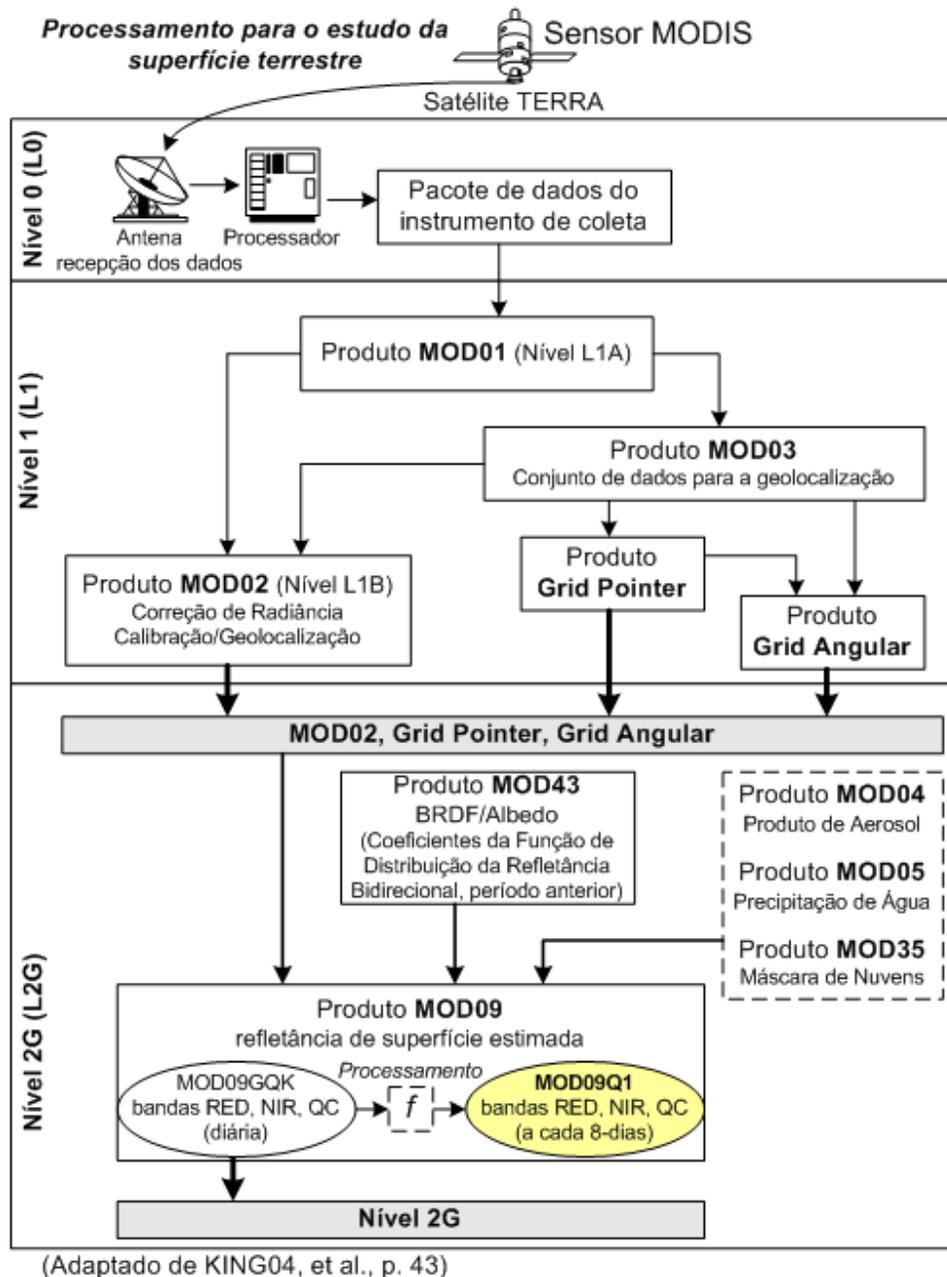


Figura 2-8: Arquitetura de processamento de dados MODIS e produtos

Fonte: Adaptado de KING et al., 2004

A precisão geométrica do *pixel* nas imagens MODIS na versão 4 passou a ser de 50 metros a partir de Dezembro de 2000, conforme havia sido projetado (Anderson et al., 2003; Shimabukuro et al., 2005). Essa precisão deve ser verificada, principalmente para

composições multitemporais, onde há a comparação com os dados de diferentes fontes, por exemplo, MODIS/TERRA e LANDSAT/TM.

A aquisição das imagens é realizada pela Internet (USGS/LPDAAC, 2007) gratuitamente até o momento da realização deste trabalho. As imagens são divididas em grades (*tile*) de 10 por 10 graus do equador, conforme ilustrado na Figura 2-9. O sistema de coordenadas da grade inicia em (0,0) (número da grade horizontal, número da grade vertical) no canto superior esquerdo e procegue à direita (horizontal) e para baixo (vertical). O sistema de coordenadas da grade finaliza em (35,17), localizada no canto inferior direito. A grade (13,11) (**h**orizontal, **v**ertical) contempla a área de estudo no trabalho. A escolha do sensor MODIS é uma opção interessante para fins de estudo em aplicações nas culturas agrícolas devido à aquisição gratuita das imagens, por apresentar imagens com uma ótima correção atmosférica, por apresentar imagens com um ótimo georeferenciamento e por apresentar produtos específicos e em grade facilitando (sob o aspecto do tamanho do arquivo) a aquisição remota das imagens pela Internet.

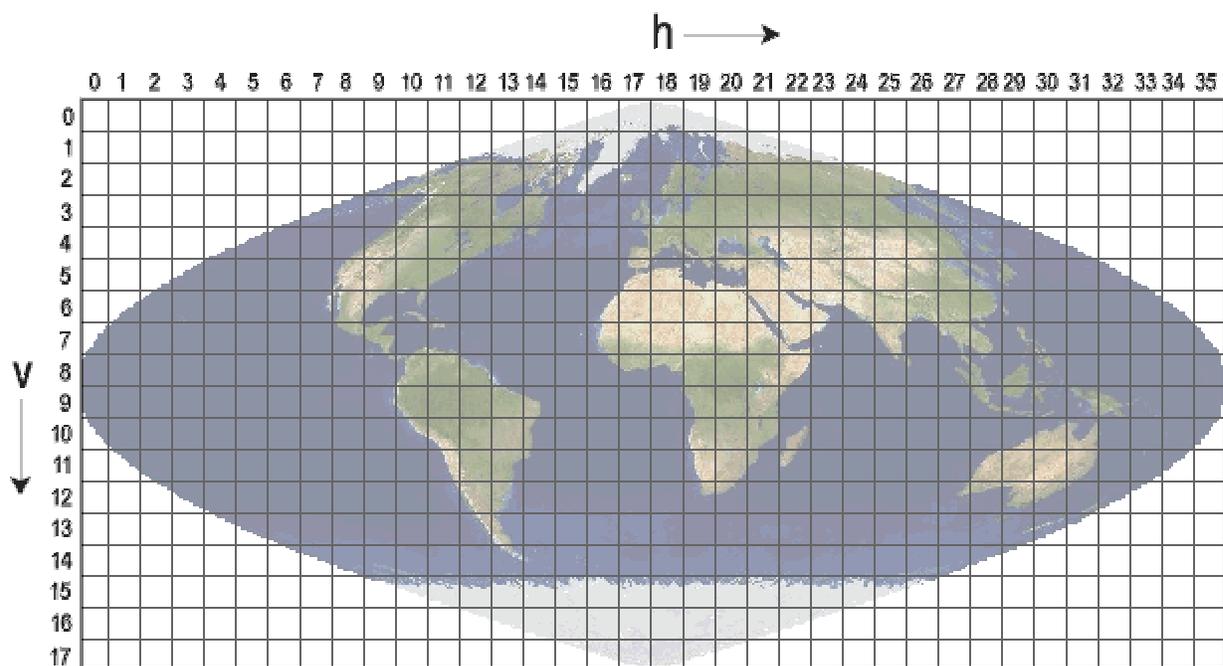


Figura 2-9: MODIS Sinusoidal Grid

Fonte: GSFC/NASA, 2008

2.3.3 O comportamento espectral de culturas agrícolas

Parte da radiação que incide sobre a planta é refletida na superfície, parte é absorvida de modo a tornar-se fisiologicamente eficaz, e o restante é irradiado. Os valores de refletância são uma propriedade da superfície vegetal e dependem das características particulares de cada espécie vegetal, além do estágio fenológico e de condições adversas do clima, como secas e geadas. A Figura 2-10 ilustra a curva característica da refletância da vegetação sadia, no período de coleta de dados em que não há ocorrência de chuva. Observa-se na Figura 2-10 que a vegetação reflete de 40 a 50% no infravermelho-próximo, correspondente ao intervalo de 700 nm a 1300 nm, e a fotossíntese absorve de 80 a 90% da luz na faixa do espectro do visível, correspondente ao intervalo de 400 nm a 700 nm.

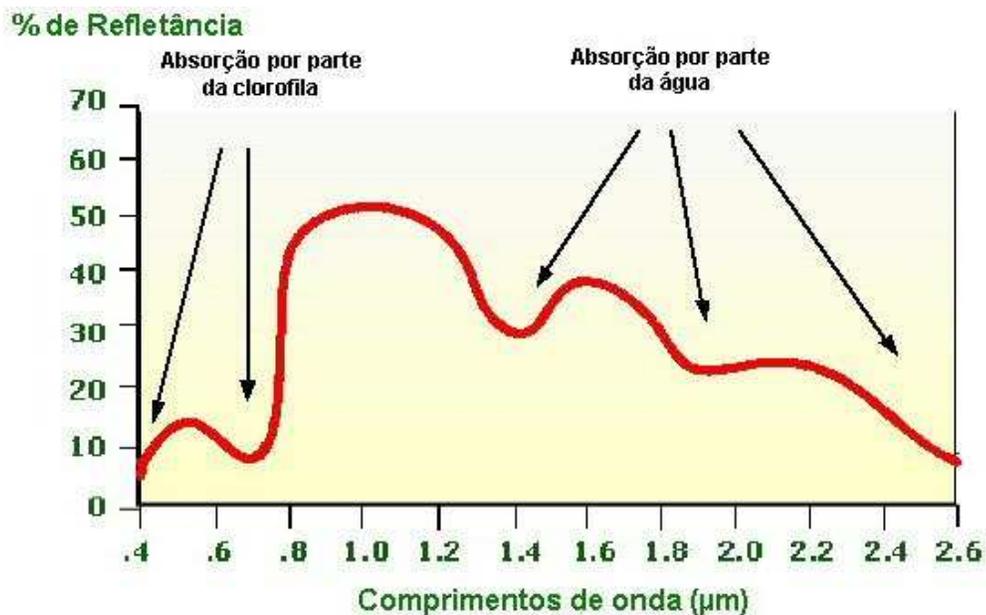


Figura 2-10: Refletância da vegetação

Fonte: Meneses et al., 2001

Curran (1986) identifica a espessura da folha como fator que afeta o conteúdo de pigmentos e estrutura fisiológica. A diminuição da quantidade dos pigmentos da planta resulta em um aumento da refletância em comprimentos de onda relativos ao azul e ao vermelho. A refletância das superfícies vegetais é fortemente influenciada pelo efeito do brilho do solo. Tal influência é inversamente proporcional ao Índice de Área Foliar (IAF), ou seja, à medida que aumenta o IAF diminui o efeito do brilho do solo sobre a refletância das coberturas vegetais.

Segundo Cock (2001), o padrão geral de desenvolvimento do IAF em cana-de-açúcar é aumentar até o máximo entre 4-8 meses e então lentamente declinar. Valores máximos de mais de 8 têm sido relatados, mas os valores mais comuns ficam entre 4-5, embora, a análise de séries de experimentos em diferentes partes da Austrália, relatam a alta proporção dos testes com IAF máximo variando de 6-8.

2.3.4 O índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI

Índices de vegetação podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com os parâmetros da vegetação. Na prática, a importância dos índices de vegetação está em sua estreita correlação com vários parâmetros biofísicos da vegetação, ou seja, na possibilidade de se estimar parâmetros como o índice de área foliar (IAF), biomassa vegetal, produtividade e atividade fotossintética. Pode-se acrescentar, ainda, a correlação dos índices de vegetação com outros parâmetros, como a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PAR) ou a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (*f*APAR) (Epiphanyo e Huete, 1994), e a porcentagem de cobertura verde (COV) (Elvidge e Chen, 1995). A biomassa verde de uma comunidade de plantas pode ser diretamente relacionada ao índice de área foliar (Turner et al., 1999) que por sua vez é positivamente correlacionado com a quantidade de clorofila por unidade de área e, também, com o grau de recobrimento do solo.

A normalização proposta por Rouse et al. (1973) visou eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica e o problema das interferências do solo na resposta da vegetação, observados para dados multitemporais. Com esta normalização, a partir dos valores de níveis de cinza obtidos das bandas do vermelho e infravermelho-próximo, obtém-se o índice NDVI que está contido em uma escala de valores que varia entre -1 e 1. Para esse índice, adota-se a seguinte expressão:

$$\text{NDVI} = (\text{infravermelho-próximo} - \text{vermelho}) / (\text{infravermelho-próximo} + \text{vermelho}) \quad (1)$$

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

Em cenas com vegetação, o NDVI varia com valores positivos entre 0,1 e 1,0. Para determinar o intervalo de valores NDVI para a vegetação que corresponde ao alvo em estudo, faz-se necessário previamente conhecer: 1) o perfil espectral do alvo em estudo ao longo do ciclo vegetativo; 2) valores válidos para o *pixel* em cada banda da imagem, no caso -100 a 16000 para MOD09Q1; 3) avaliação de qualidade de cada *pixel* amostrado em fator de refletância bidirecional (FRB). Neste trabalho, para as regiões em estudo sobre o ciclo vegetativo da cultura da cana-de-açúcar, valores aceitáveis para o NDVI encontrados estão no intervalo $0,20 < \text{NDVI} < 0,92$, onde os valores mais altos são associados com maior vigor e densidade da cobertura vegetal. Este intervalo de valores foi identificado para as micro-regiões monitoradas no trabalho através de inspeção manual aos dados do perfil temporal do NDVI de acordo com o comportamento espectral específico para a cultura da cana-de-açúcar ao longo das quatro fases do ciclo fenológico de uma safra da cana-soca: 1) estabelecimento; 2) perfilhamento; 3) formação dos colmos; e 4) amadurecimento.

2.3.5 O NDVI para estudos multitemporais

O estudo referente à evolução temporal do NDVI MODIS de *pixels* "puros", área do pixel ocupada inteiramente por cana, em áreas com cana-de-açúcar, resolução temporal de 16 dias, aplicado ao monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foi desenvolvido em Aguiar (2007). O autor constatou em seu trabalho que foi possível realizar a identificação do modo de colheita da cana através de composições desenvolvidas para a detecção do corte da cana a partir das imagens de refletância aparente diária MODIS, por meio da aplicação do modelo linear de mistura espectral (Shimabukuro e Smith, 1991; Lobell e Asner, 2004).

O estudo sobre os perfis temporais, descrevendo a condição da biomassa da cultura da soja ao longo do ciclo fenológico na região oeste do Estado do Paraná, através de imagens NDVI AVHRR/NOAA foi realizado por Esquerdo (2007). O autor constatou que correlações mais significativas ocorreram quando é considerado o ciclo completo na análise de perfis temporais, provavelmente devido à resolução temporal utilizada e a curta duração de um ciclo completo da cultura analisada.

Com o objetivo de analisar a evolução temporal do índice NDVI, máximo decendial e mensal, obtido de imagens NOAA-14, em áreas cobertas com *pixels* com proporções variáveis de soja, visando ao monitoramento dessa cultura em projetos de previsão de safras, Motta et al. (2003) constataram a viabilidade de uso destas imagens como um instrumento de monitoramento da superfície pois expressam as proporções variáveis de soja, assim como as condições de uso e cobertura diferenciadas na vizinhança de lavouras de soja.

Em Mariote et al. (2007), os autores realizaram um diagnóstico sobre as similaridades de tendências de oscilação em séries temporais. A abordagem desenvolvida pelos autores define um descritor que usa coeficientes angulares obtidos de uma segmentação linear da curva que representa a evolução das séries analisadas.

Um descritor de forma, BAS, baseado na determinação de uma função de curvatura é proposto em Arica e Vural (2003). Segundo Falcão et al. (2004), o objetivo dos descritores de forma foi caracterizar a forma do alvo analisado. Segundo os autores, o algoritmo reconhece padrões mesmo que as formas dos alvos analisados apresentem translação, rotação, escalas diferentes e distorções provocadas por ruídos.

Zhan et al. (2000) propuseram um método baseado na avaliação da magnitude entre dois períodos de tempos e na direção para a detecção de alterações em imagens MODIS nas bandas vermelho e infravermelho-próximo com 250 metros de resolução espacial.

2.3.6 Os filtros aplicados à dinâmica das curvas do NDVI

Um procedimento de ajuste de curva, através de análise harmônica e *spline*, para derivar características fenológicas foi empregado em imagens NDVI NOAA/AVHRR por Bradley et al. (2007).

Lu et al. (2007) desenvolveram um método baseado em ondeletas (*wavelets*) para a remoção de ruídos em séries temporais NDVI MODIS.

Beck et al. (2006) apresentaram um método para monitorar a vegetação em altas altitudes, usando NDVI MODIS com resolução temporal de 16 dias onde é proposta uma função logística dupla para descrever a curva NDVI de ciclo anual. Os autores concluíram que a

função proposta, quando comparada com o ajuste de curvas usando uma função Fourier de segunda ordem e uma função Gaussiana assimétrica, descreveu melhor os dados de NDVI.

Jönsson e Eklundh (2004) desenvolveram um programa (TIMESAT) para analisar séries temporais de dados NDVI NOAA/AVHRR. Os autores analisaram três métodos baseados em mínimos-quadrados para o processamento dos dados: filtragem adaptativa *Savitzky-Golay*, ajuste dos dados por uma função harmônica e polinomial (Menenti et al., 1993), e o ajuste dos dados por uma função Gaussiana (Jönsson e Eklundh, 2002) assimétrica. Os autores utilizaram o resultado das curvas suavizadas para extrair parâmetros de sazonalidade relacionados ao período de crescimento. Os autores constataram que para dados NDVI relativamente pouco afetados por ruídos, o método de filtragem adaptativa *Savitzky-Golay* funciona muito bem, mesmo com um rápido incremento ou decremento. No entanto, em situações onde os ruídos são de difícil interpretação e necessitam da aplicação de restrições, o método de ajuste dos dados por uma função Gaussiana assimétrica é menos sensível a ruídos e possibilita dar uma melhor predição para o início e fim do período.

O estudo sobre séries temporais do NDVI SPOT e a correlação com a produtividade de culturas agrícolas foi realizado em Zhang et al. (2003). Os autores avaliaram o emprego de análise harmônica, algoritmo *Harmonic Analysis of NDVI Time-Series (HANTS)*, para a suavização dos dados NDVI de séries temporais.

Neste trabalho, avaliou-se a forma de curva obtida com a suavização do perfil temporal do NDVI, empregando-se os filtros Média Móvel e *Savitzky-Golay*. Como pode ser observado na Figura 2-11, o filtro Média Móvel provoca distorções na forma de curva, que são mais significativas no período de corte da cultura da cana-de-açúcar, devido a uma queda no valor do NDVI que ocorre gradualmente conforme os talhões de cana-soca são colhidos. Ao encontrar esta queda, o filtro Média Móvel realiza uma suavização desta ocorrência ao longo do tempo e, conseqüentemente, ocorre um deslocamento do perfil temporal do NDVI nas próximas safras. O filtro *Savitzky-Golay* é menos sensível as variações bruscas do perfil temporal do NDVI, no entanto, ruídos de intensidade significativa ainda influenciam um pouco na forma de curva. A fim de gerar uma forma de curva do perfil temporal do NDVI que minimize adequadamente as influências dos períodos de corte e do início da rebrota, onde há

solo exposto e palha da cultura, correções nestes períodos são realizadas nas formas de curvas após a suavização com o filtro Savitzky-Golay.

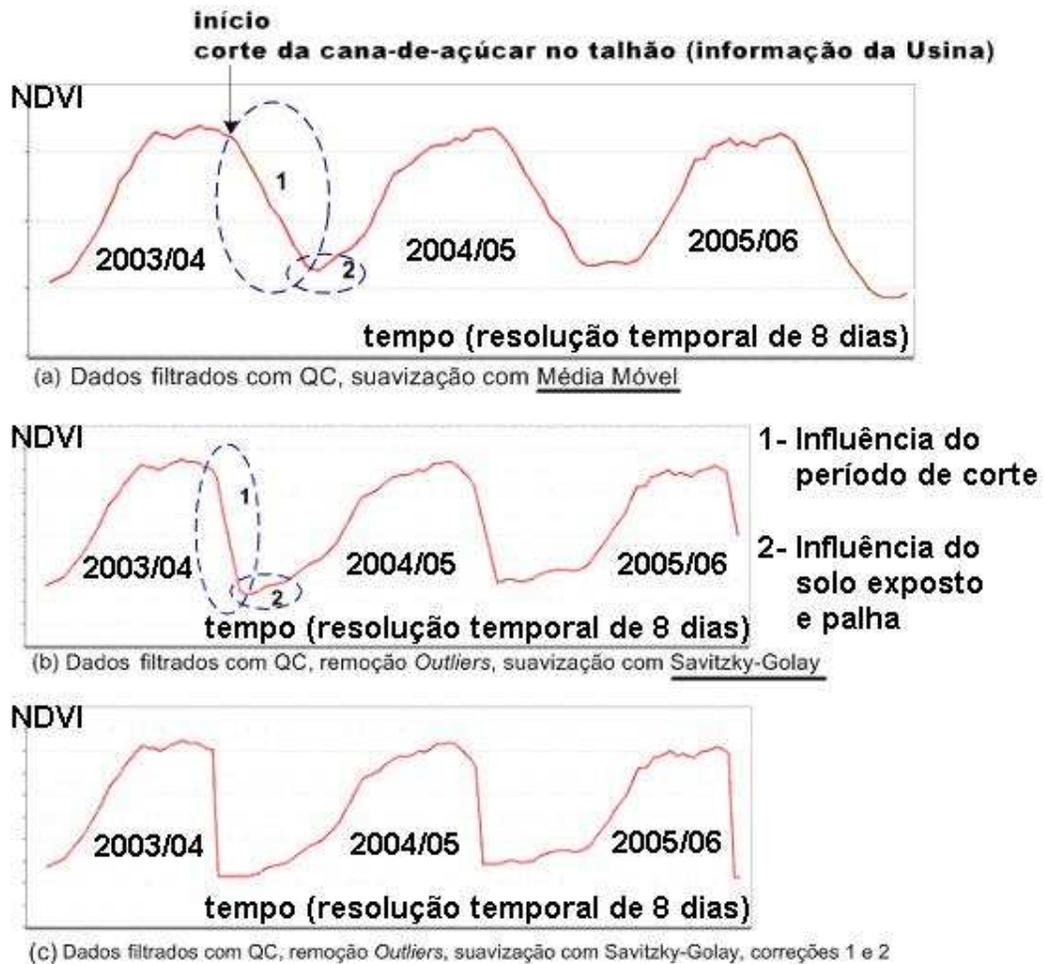


Figura 2-11: Análise comparativa entre os filtros Média Móvel e Savitzky-Golay

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Áreas de estudo: localização e caracterização

A região monitorada no trabalho compreende às fazendas: Fazenda São Luiz, Fazenda Espírito Santo, Fazenda Espírito Santo em São Bom Retiro, Fazenda São Carlos e Fazenda São Francisco. As fazendas encontram-se localizadas em torno dos municípios Irapuã e Borborema, no Estado de São Paulo e estão associadas a usina Santa Elisa. As coordenadas geográficas dos cantos inferior direito LAT/LONG ($-23,22^\circ$; $-46,86^\circ$) e superior esquerdo LAT/LONG ($-20,69^\circ$; $-49,62^\circ$), na projeção Geográfica, *datum* WGS-84 e unidade graus decimais, delimitam a área de recorte nas imagens utilizadas neste trabalho. A *tile* H13V11, do produto fator de refletância bidirecional MOD09, cobre a região de interesse para a cultura da cana-de-açúcar, durante as safras de 2004/05 e 2005/06, conforme ilustrado na Figura 3-1.

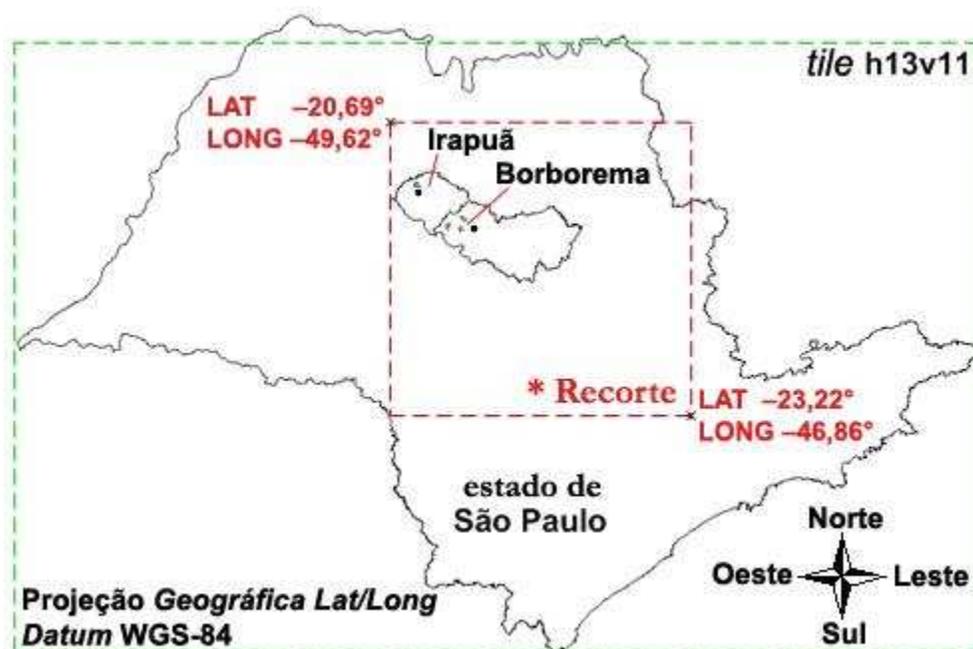


Figura 3-1: Localização da área de estudo do trabalho

3.1.2 Informações cartográficas

Foram utilizadas informações cartográficas dos limites municipais das regiões do Estado de São Paulo obtidas do IBGE (2001). As malhas estaduais e municipais foram adquiridas em formato DXF.

3.1.3 Informações de sensoriamento remoto

As imagens MODIS produtos MOD09Q1, contendo as bandas vermelho, infravermelho-próximo e controle de qualidade, versão 4, resolução temporal com composição a cada oito dias, foram adquiridas em USGS/LPDAAC (2007), nos anos de 2004, 2005 e 2006. Cada ano contém em condições ideais sob a presença de uma composição a cada 8 dias, 46 produtos MOD09Q1. As safras da cana-soca 2004/05 e 2005/06 foram o objeto de estudo neste trabalho porque foram os dados disponíveis adquiridos das usinas de cana-de-açúcar durante a sua realização.

A versão 4 do produto MOD09Q1, definida como estável, iniciou oficialmente em 1 de Janeiro de 2003. Em 31 de Dezembro de 2006 encerrou-se a disponibilização da versão 4 do produto MOD09Q1. Em 1 de Janeiro de 2007 iniciou-se a disponibilização da versão 5 do produto MOD09Q1. O término do processamento da versão 5 do produto MOD09Q1 para os anos anteriores, Março/2000 à Dezembro/2006, ocorreu ao final do mês de Maio de 2008. A Figura 3-2 ilustra a disponibilidade temporal das imagens MODIS.

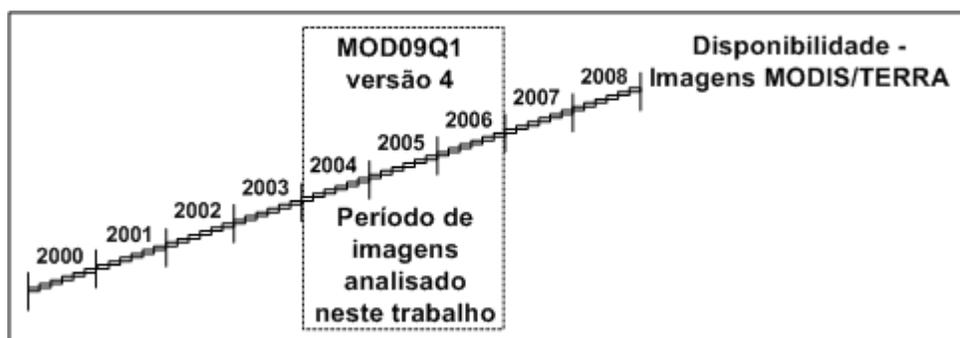


Figura 3-2: Disponibilidade temporal das imagens MODIS

3.1.4 Programas computacionais

Para o processamento e análise dos dados e das imagens MODIS/TERRA foram utilizados os programas: 1) *Modis Reprojection Tool* (USGS/LPDAAC, 2007), para a extração das bandas de interesse, recorte das imagens e re-projeção dos dados para a projeção geográfica LAT/LONG e *datum* WGS-1984, graus decimais; 2) ENVI / IDL 4.2 / 6.3 (SULSOFT, 2005), para a fase inicial do trabalho referente à seleção dos *pixels* desejados na região em estudo; e 3) PostgreSQL 8.2.3 (PostgreSQL, 2008), como sistema gerenciador de banco de dados.

3.1.5 Dados das fazendas de cana-de-açúcar

Nas regiões monitoradas, os dados das safras de 2004/05 e 2005/06 foram obtidos para cada talhão: identificação do talhão, variedade, solo, fazenda, data de plantio, data de corte, produtividade e estágio da cana. Os tipos de solos identificados na região em estudo são apresentados no Quadro 3-1. As variedades de cana-de-açúcar identificadas na região em estudo são apresentadas no Quadro 3-2. O Quadro 3-3 apresenta como a classificação do ambiente está conectada no banco de dados através de identificadores do solo e da variedade, na região em estudo. Neste trabalho não foi realizado distinção quanto a cana crua e a cana queimada, no que diz respeito a forma de curva do perfil temporal do NDVI. Os identificadores são as chaves de acesso aos dados no banco de dados.

Identificador Solo	Descrição do Solo
1	LVA-7 – Latossolo Vermelho-Amarelo, Eutrófico típico, textura média, A moderado, relevo suave ondulado a plano
2	LVA-8 – Latossolo Vermelho-Amarelo, Distrófico típico, textura média, A moderado, relevo suave ondulado a plano
3	LVA-9 – Latossolo Vermelho-Amarelo, Distrófico típico, textura média, álico, A moderado, relevo suave ondulado a plano
4	PVA-13 – Argissolo Vermelho-Amarelo, Eutrófico típico, textura média, A moderado, relevo ondulado a suave ondulado
5	PVA-75 – Argissolo Vermelho-Amarelo, Eutrófico latossólico, textura média, A moderado, relevo suave ondulado

Quadro 3-1: Tipos de solos identificados na região em estudo

Fonte: Usina Santa Elisa

Identificador Variedade	Variedade	Maturação
1	RB 72-454	Tardia
2	RB 85-5453	Precoce
3	SP 81-3250	Média
4	SP 83-2847	Tardia
5	SP 84-1431	Média

Quadro 3-2: Variedades de cana-de-açúcar identificadas na região em estudo
Fonte: Usina Santa Elisa

Identificador Micro-região	Identificador Ambiente	Identificador Solo	Identificador Variedade
1	2	1	5
2	8	4	2
3	1	1	1
4	7	4	1
5	3	2	1
6	6	3	4
7	4	3	2
8	9	5	2
9	3	2	1
10	5	3	3

Quadro 3-3: Classificação do ambiente na região em estudo

O Quadro 3-4 apresenta para cada micro-região monitorada: a quantidade de talhões, a quantidade de *pixels* selecionados e a área ocupada pela micro-região (em hectare). A Figura 3-3 ilustra graficamente a produtividade, em toneladas de cana por hectare (ton/ha), da cultura da cana-de-açúcar das micro-regiões nas safras 2004/2005 e 2005/2006. Cada micro-região está associada a um conjunto de talhões. A produtividade, em ton/ha, da micro-região em uma

safra é determinada pela média dos valores de produtividade, em ton/ha, dos talhões. A Figura 3-4 ilustra graficamente o estágio de corte para cada micro-região na safra 2005/2006.

Identificador Micro-região	Quantidade de Talhões	Quantidade de <i>Pixels</i> (selecionados)	Área (hectare) (a partir dos <i>pixels</i> selecionados)
1	10	19	118,75
2	3	3	18,75
3	3	4	25,00
4	3	4	25,00
5	6	10	62,50
6	2	3	18,75
7	3	4	25,00
8	4	5	31,25
9	2	5	31,25
10	4	6	37,50
Total: 10	Total: 40	Total: 63	Total: 393,75

Quadro 3-4: Dados quantitativos sobre as regiões monitoradas no trabalho

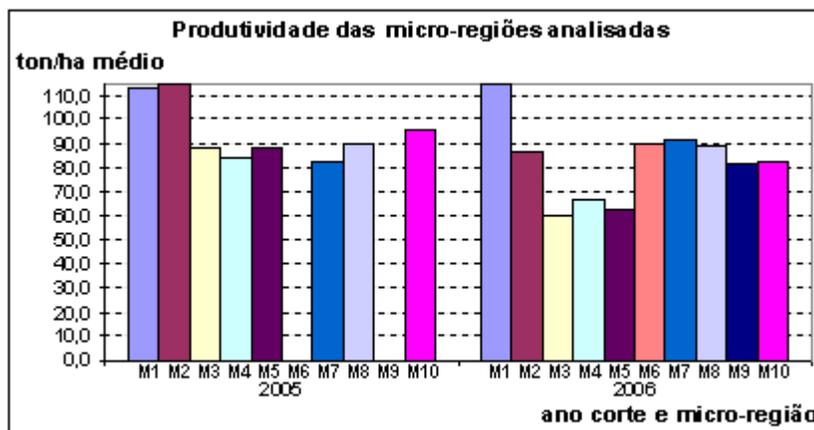


Figura 3-3: Dados de produtividade em ton/ha sobre as regiões monitoradas no trabalho

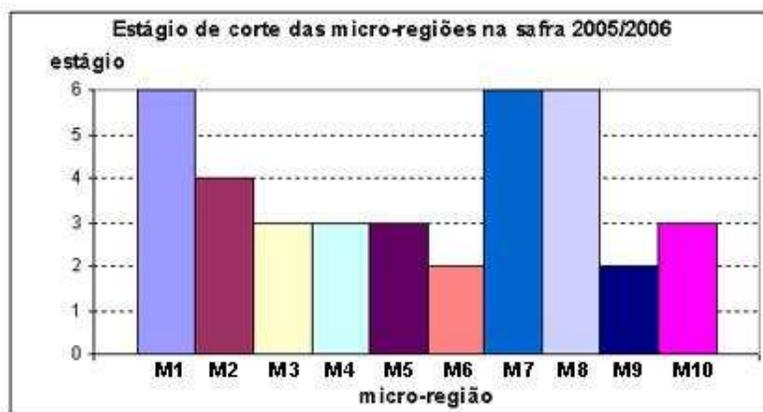


Figura 3-4: Estágio de corte das micro-regiões na safra 2005/2006

3.1.6 Dados de Precipitação

Com o objetivo de apoiar na compreensão do comportamento das formas de curvas do perfil temporal do NDVI ao longo de uma safra da cultura da cana-de-açúcar, adquiriu-se dados de precipitação da região de estudo deste trabalho.

Em meteorologia, a precipitação consiste na liberação de água proveniente da atmosfera sobre a superfície da Terra, sob a forma de chuvisco, chuva, granizo, saraiva ou neve (CEPAGRI, 2008). Para se medir a quantidade de precipitação caída por unidade de superfície, durante um certo intervalo de tempo, utiliza-se um pluviômetro. A medição exprime-se em milímetros de altura (mm) ou em litros por metro quadrado (l/m^2). A cada litro por metro quadrado corresponde a um milímetro de altura. A precipitação mensal é obtida a partir da soma do volume de água durante todos os dias de um mês. No escopo deste trabalho, a precipitação é abordada exclusivamente sob a forma de chuva. O Quadro 3-5 apresenta a precipitação média mensal entre Junho de 1998 à Junho de 2003, respectivamente, nos municípios de Borborema e Irapuã. A representação gráfica destes dados de precipitação é apresentada na Figura 3-5.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Precipitação (mm) Borborema	220 a	180 a	140 a	50 a	40 a	35 a	20 a	20 a	50 a	110 a	120 a	180 a
Precipitação (mm) Irapuã	220 a	180 a	150 a	70 a	50 a	35 a	25 a	20 a	60 a	100 a	140 a	220 a

Quadro 3-5: Precipitação média mensal entre Junho/1998 à Junho/2003 nos municípios de Borborema e Irapuã

Fonte: CEPAGRI (2008)

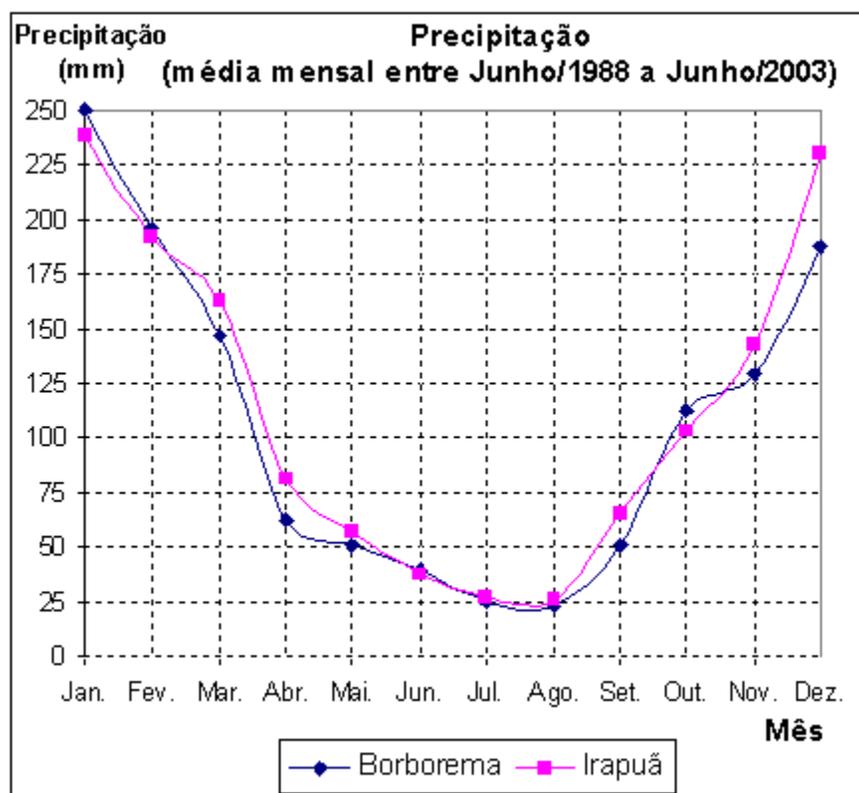


Figura 3-5: Precipitação média mensal da região em estudo

3.2 Metodologia

3.2.1 Introdução

A análise do problema proposto neste trabalho é constituída por seis fases, a constar: 1) construção do banco de dados temporal referente aos dados da *Usina*; 2) construção do banco de dados temporal referente aos dados das *Regiões* de monitoramento; 3) construção do banco de dados temporal para o armazenamento dos *Pixels*; 4) filtragem dos dados e suavização das formas de curvas do perfil temporal do NDVI; 5) construção gráfica das formas de curvas do perfil temporal do NDVI; e 6) interpretação e avaliação das formas de curvas do perfil temporal do NDVI. A Figura 3-6 ilustra as fases do trabalho.

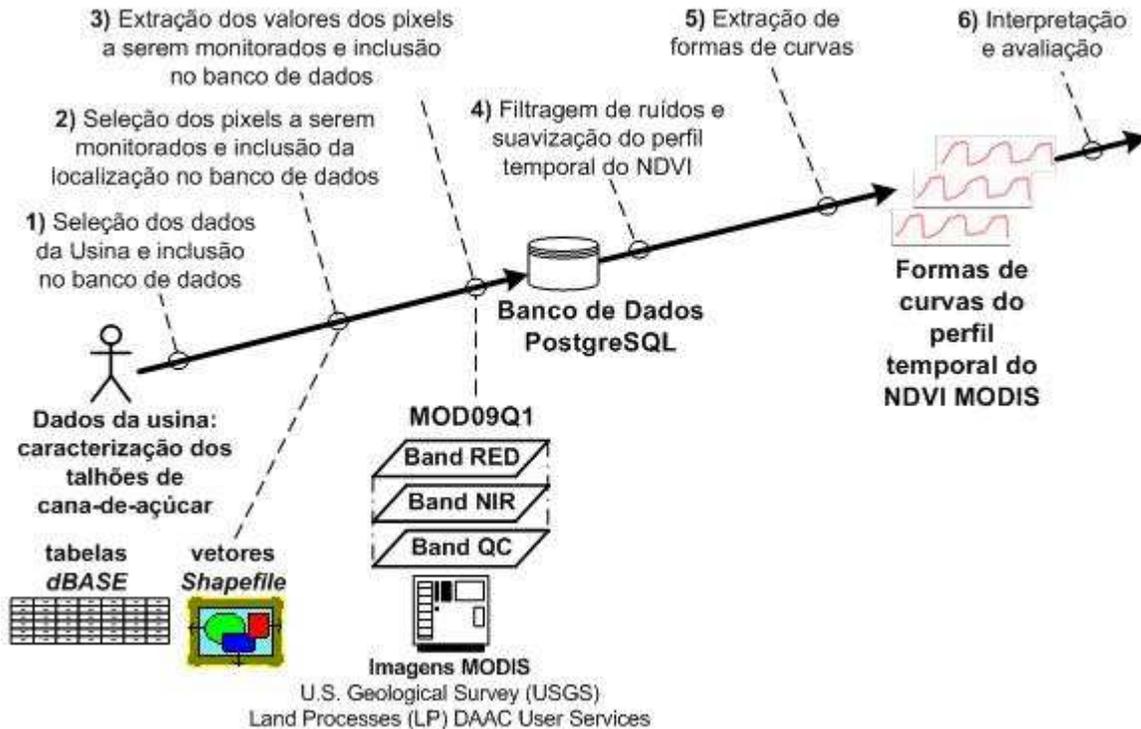


Figura 3-6: Fases do Trabalho

Para a realização das fases 1, 2 e 3 do trabalho, referentes respectivamente à construção do banco de dados contendo os esquemas *Usina*, *Região* e *Pixel*, elaborou-se o projeto do diagrama entidade-relacionamento (DER), conforme ilustrado na Figura 3-7. A implementação deste banco de dados possibilita extrair formas de curvas através do perfil temporal NDVI na cultura da cana-de-açúcar. A modelagem concebida para o DER é de fácil

entendimento para o usuário, propicia integridade aos dados, possibilita obter alto desempenho para as consultas aos dados, reduz o espaço necessário em disco para o armazenamento dos dados, atende aos requisitos do estudo de caso deste trabalho e é acessível por qualquer software, incluindo os *SIGs*, através da linguagem de consulta padronizada *SQL-92*. A simplificação deste modelo visa facilitar a inclusão e a consulta aos dados pelos programas destinados exclusivamente a avaliar a evolução do perfil temporal do NDVI MODIS. No esquema *Região* também é possível armazenar a definição de outros sensores, satélites e produtos, apesar de não ser o foco neste trabalho.

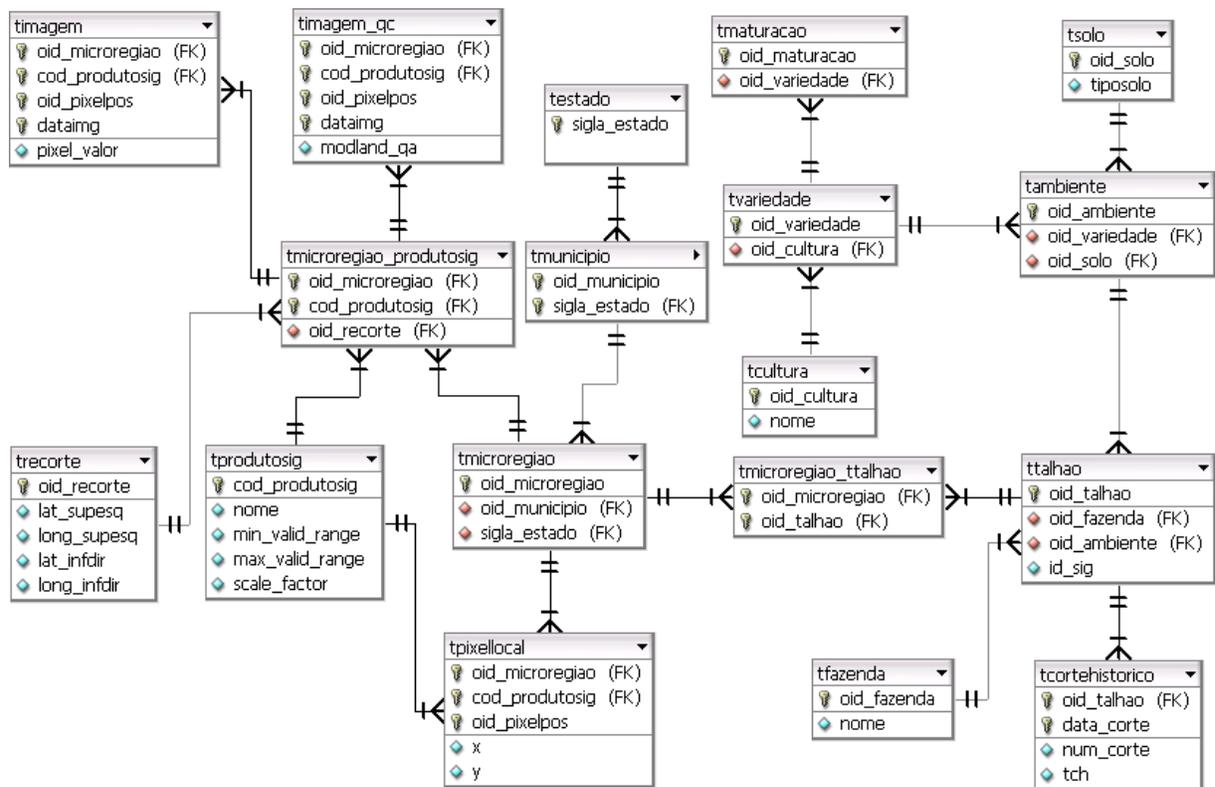


Figura 3-7: Diagrama Entidade-Relacionamento, notação Peter Chen

O banco de dados desenvolvido para o trabalho contempla o relacionamento entre 1) os dados de plantio e colheita nos talhões de cana-de-açúcar obtidos da usina de cana-de-açúcar; 2) os dados de localização escalar dos pixels selecionados para cada micro-região, extraídos dos vetores dos talhões de cana-de-açúcar; e 3) os valores dos *pixels*, correspondentes ao fator de refletância bidirecional (FRB), extraídos das bandas do vermelho e do infravermelho-próximo,

e os valores de controle de qualidade do produto MOD09Q1. Conforme observado na Figura 3-8, os dados adquiridos das usinas de cana-de-açúcar foram armazenados no esquema do banco de dados nomeado *Usina*. Uma usina de cana-de-açúcar pode possuir várias fazendas sob monitoramento e cada uma dessas fazendas está relacionada a um conjunto de talhões. Em cada agrupamento de talhões contíguos tem-se uma micro-região de estudo. O conjunto de micro-regiões foi armazenado no esquema do banco de dados nomeado *Região*, no qual a localização de cada *pixel* de cada micro-região foi armazenada para fins de extração dos *pixels* de cada banda da imagem utilizada no trabalho. O esquema *Pixel* armazena os valores dos *pixels* das bandas do vermelho, do infravermelho-próximo e de controle de qualidade, temporalmente, cuja extração foi realizada de forma automática por meio de aplicativo desenvolvido neste trabalho, descrito em detalhes na Fase 3. O resultado da implementação da criação do modelo físico do bancos de dados encontra-se descrito no Anexo B.

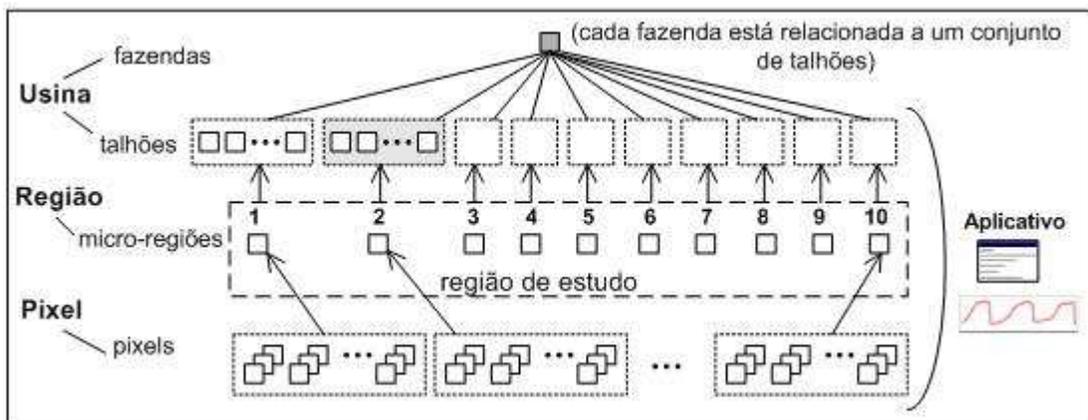


Figura 3-8: Estrutura de armazenamento dos dados do trabalho nos banco de dados

3.2.2 Fase 1 – Construção do banco de dados referente aos dados da Usina

O histórico dos dados de produtividade dos talhões na região em estudo foi adquirido da usina de cana-de-açúcar, validado através de inspeção manual e armazenado no banco de dados estruturado para este trabalho, esquema nomeado *Usina*. Associados aos dados de produtividade, encontram-se os vetores dos talhões de cana-de-açúcar. Os talhões de cana-de-açúcar descritos por um arquivo vetor formato tipo *Shapefile* fornecido pela usina de cana-de-açúcar são avaliados com o aplicativo de processamento de imagens *ENVI* segundo os

critérios tipo de solo, tipo de variedade, histórico das datas de cortes, e os dados de localização escalar dos *pixels* selecionados para o monitoramento foram armazenados no esquema do banco de dados nomeado *Região*.

O esquema nomeado *Usina* é constituído pelas tabelas: maturação (Figura 3-10), variedade (Figura 3-11), solo (Figura 3-12), cultura (Figura 3-13), ambiente (Figura 3-14), fazenda (Figura 3-15), histórico de corte (Figura 3-16), talhão (Figura 3-17). A tabela talhão tem por objetivo armazenar o relacionamento entre todas as características de um talhão de cana-de-açúcar temporalmente através do histórico de corte: data do corte, estágio do corte e produtividade em toneladas de cana por hectare e contém os dados: identificador único do talhão, identificador único da fazenda associada, identificador único do ambiente de cultivo caracterizado pelo tipo de solo e variedade da cultura, sendo que a variedade pode estar associada ao tipo de maturação – precoce, média e tardia, e a cultura – cana-de-açúcar, a data de plantio e a área efetivamente plantada em hectares.

Os dados adquiridos das usinas de cana-de-açúcar necessitam ser persistidos porque foram adquiridos no formato tabular com um único arquivo para cada safra em formato *dBASE* e vetorial com a informação dos talhões de cana-de-açúcar, arquivo formato *Shapefile*. Problemas comumente encontrados em dados no formato tabular são a presença de dados incompletos, dados redundantes conforme exemplo Figura 3-9a, dados inconsistentes como a presença de zero em campos em que de fato ainda não ocorreu a atribuição de valores e/ou valores fora do domínio aceitável conforme as regras de negócio do sistema e ausência de restrições de integridade de entidade, referencial e de domínio. As restrições de integridade são regras que definem a validade dos dados. Uma base de dados está num estado de integridade quando contém apenas dados válidos e os dados armazenados devem estar de acordo com a realidade.

...	solo	...
...	"Iva-7 - txt.grossa - eut+endoeu"	...
	"Iva-7 - txt.grossa - eut+endoeu"	
	"Iva-8 - txt.grossa - dist+epieiu"	
	"Iva-8 - txt.grossa - dist+epieiu"	
	"Iva-9 - txt.grossa - alico"	
	"Iva-9 - txt.grossa - alico"	
	"Iva-9 - txt.grossa - alico"	
	"pva-13 - txt.grossa - eut+endoeu - "a" < 30"	
	"pva-13 - txt.grossa - eut+endoeu - "a" < 30"	
	"pva-75 - txt.grossa - eut+endoeu"	

a) Dados adquiridos

Identificador	Descrição Solo
1	"Iva-7 - txt.grossa - eut+endoeu"
2	"Iva-8 - txt.grossa - dist+epieiu"
3	"Iva-9 - txt.grossa - alico"
4	"pva-13 - txt.grossa - eut+endoeu - "a" < 30"
5	"pva-75 - txt.grossa - eut+endoeu"

b) Dados tratados através da criação de uma nova tabela

Figura 3-9: Exemplo de tratamento dos dados adquiridos da usina

Dados incompletos ou inconsistentes foram descartados durante a importação dos dados. O conceito de temporalidade sobre os dados importados foi incorporado durante a importação dos dados através do preenchimento da tabela histórico de corte em cada safra e para cada talhão. A Figura 3-9b ilustra como a redundância de dados foi tratada para o caso da Figura 3-9a, através da criação de uma nova tabela contendo um identificador para o solo e a sua respectiva descrição. A tabela criada, ilustrada na Figura 3-9b reduz a quantidade de informação necessária para armazenamento no banco de dados e previne que um determinado tipo de solo seja utilizado com vários nomes semelhantes. Contudo, apesar da tabela da Figura 3-9b minimizar os problemas de redundância de dados, é de responsabilidade do Analista de Dados inspecionar os dados e garantir que estes estejam de acordo com os requisitos do sistema.

oid_maturacao smallint	tipo character varying(23)
1	precoce
2	media
3	tardia

Figura 3-10: Exemplo de dados armazenados na tabela *tmaturacao*

oid_variedade smallint	oid_cultura smallint	variedade character varying(23)
1	1	rb 72-454
2	1	rb 85-5453
3	1	sp 81-3250
4	1	sp 83-2847
5	1	sp 84-1431

Figura 3-11: Exemplo de dados armazenados na tabela *tvariedade*

oid_solo smallint	tiposolo character varying(57)
1	lva-7 - txt.grossa - eut+endoeu
2	lva-8 - txt.grossa - dist+epieü
3	lva-9 - txt.grossa - alico
4	pva-13 - txt.grossa - eut+endoeu - a < 30
5	pva-75 - txt.grossa - eut+endoeu

Figura 3-12: Exemplo de dados armazenados na tabela *tsolo*

oid_cultura smallint	nome character varying(30)
1	cana-de-açúcar

Figura 3-13: Exemplo de dados armazenados na tabela *tcultura*

oid_ambiente smallint	oid_solo smallint	oid_variedade smallint
1	1	1
2	1	5
3	2	1
4	3	2
5	3	3
6	3	4
7	4	1
8	4	2
9	5	2

Figura 3-14: Exemplo de dados armazenados na tabela *tambiente*

oid_fazenda smallint	nome character varying(57)
105	Faz. Sao Luiz
108	Faz. Espirito Santo
110	Faz. Espirito Santo - S. Bom Retiro
111	Faz. Sao Carlos
147	Faz. Sao Francisco

Figura 3-15: Exemplo de dados armazenados na tabela *tfazenda*

oid_talhao smallint	data_corte date	num_corte smallint	tch real	producao_obtida double precision
1	2006-05-15	6	119	1918.59
2	2006-05-13	6	114	1085.19
3	2006-05-17	6	135	2891.26

Figura 3-16: Exemplo de dados armazenados na tabela *tcortehistorico*

oid_talhao smallint	oid_fazenda smallint	oid_ambiente smallint	id_sig character varying(16)	data_plantio date	areaplantadahectare real
1	147	2	0200014700030004	2000-05-15	16
2	147	2	0200014700030005	2000-05-15	10
3	147	2	0200014700030007	2000-05-15	21

Figura 3-17: Exemplo de dados armazenados na tabela *ttalhao*

3.2.3 Fase 2 – Construção do banco de dados referente aos dados da Região

O objetivo do banco de dados, esquema nomeado *Região* foi armazenar os dados de localização escalar, expressa em X e Y dos *pixels* selecionados e que foram posteriormente extraídos e armazenados no banco de dados, esquema nomeado *Pixel*. Uma micro-região neste trabalho corresponde a um conjunto de talhões com características comuns segundo determinados critérios. Os critérios adotados para a formação de uma micro-região neste trabalho foram: 1) mesmo ambiente, caracterizado neste trabalho pelo tipo de solo e variedade da cana-de-açúcar; 2) talhões contíguos sob a presença da cultura da cana-de-açúcar; e 3) período de corte entre os talhões não superior a 8 dias. O critério conservador, a fim de evitar influências na interpretação do comportamento do alvo em estudo, adotado para a seleção dos *pixels*, na resolução espacial de 250 x 250 metros, consiste em selecionar apenas o *pixel* que possua cobertura da área superior a 75 %, aproximadamente, do alvo desejado internamente ao vetor dos talhões, conforme ilustrado na Figura 3-18. As áreas hachuradas da Figura 3-18 correspondem aos *pixels* selecionados para o monitoramento e as linhas representam o contorno dos talhões de cana-de-açúcar. O Anexo A apresenta todas as micro-regiões monitoradas no trabalho.

De posse dos vetores em formato de arquivo *Shapefile* adquirido da usina de cana-de-açúcar, com o aplicativo ENVI analisam-se as micro-regiões candidatas (Figura 3-19) e a localização dos *pixels* “puros” desejados para o monitoramento em cada micro-região, que posteriormente foram armazenados no banco de dados, esquema nomeado *Região*. Neste trabalho, um *pixel* “puro” corresponde à área do *pixel* ocupada inteiramente por cana e compreendido em sua totalidade dentro dos talhões agrupados em uma micro-região com características comuns.

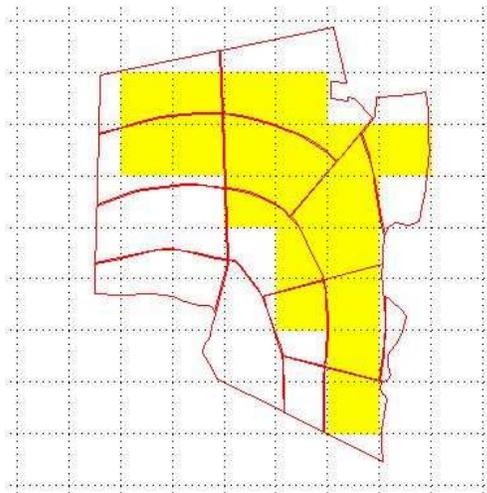


Figura 3-18: Critério de seleção dos pixels em uma micro-região

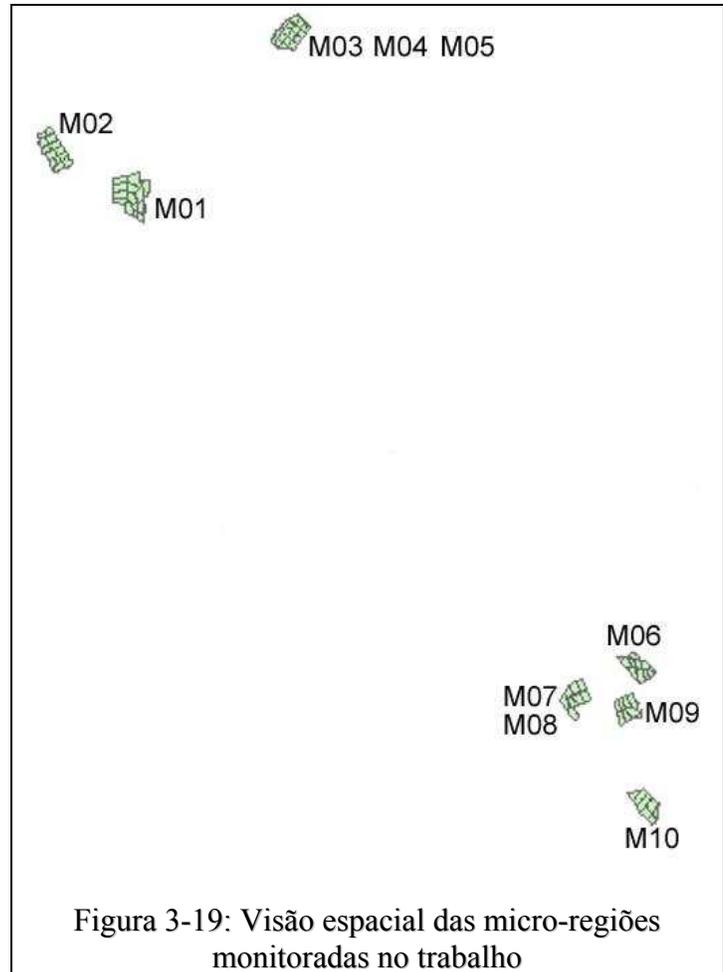


Figura 3-19: Visão espacial das micro-regiões monitoradas no trabalho

O esquema nomeado *Região* é constituído pelas tabelas: Estado (Figura 3-20), município (Figura 3-21), tipo de produto (Figura 3-22), região de recorte (Figura 3-23), localização escalar do pixel em cada banda da imagem (Figura 3-24), micro-região (Figura 3-25), relacionamento da micro-região com o tipo de produto (Figura 3-26), relacionamento da micro-região com o talhão (Figura 3-27). O conceito de região de estudo neste trabalho compreende a área de recorte das imagens NDVI, localizada no Estado de São Paulo, de acordo com a Figura 3-1. A micro-região é uma tabela do esquema nomeado *Região* que tem por objetivo relacionar um conjunto de talhões com características semelhantes, de acordo com critérios descritos previamente. A tabela micro-região contém os campos: identificador único da micro-região, identificador único do município, as coordenadas geográficas do *pixel* central do conjunto de talhões contidos na micro-região, as coordenadas geográficas do canto superior direito e do canto inferior esquerdo de um retângulo que envolve a micro-região.

Uma micro-região é, portanto, constituída de um ou mais talhões com características comuns. Cada talhão armazenado no banco de dados possui um ou mais *pixels* com coordenadas escalares, localização X e Y na imagem da região de recorte. A tabela tipo de produto consiste em armazenar a descrição das características das seis bandas das imagens MODIS/TERRA utilizadas no trabalho, conforme apresentado no Quadro 3-6.

Identificador abreviado do produto	Descrição do produto	Identificação estendida do produto
MOD09Q1.004.0250m.RED	Banda espectral da imagem no vermelho, produto MODIS versão 4, resolução temporal a cada 8 dias	<i>MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid, RED Band</i>
MOD09Q1.004.0250m.NIR	Banda espectral da imagem no infravermelho-próximo, produto MODIS versão 4, resolução temporal a cada 8 dias	<i>MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid, NIR Band</i>
MOD09Q1.004.0250m.QC	Banda espectral da imagem de controle de qualidade, produto MODIS versão 4, resolução temporal a cada 8 dias	<i>MODIS/Terra Quality Control 8-Day L3 Global 250m SIN Grid, QC Band</i>
MOD09Q1.005.0250m.RED	Banda espectral da imagem no vermelho, produto MODIS versão 5, resolução temporal a cada 8 dias	<i>MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid, RED Band</i>
MOD09Q1.005.0250m.NIR	Banda espectral da imagem no infravermelho-próximo, produto MODIS versão 5, resolução temporal a cada 8 dias	<i>MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid, NIR Band</i>
MOD09Q1.005.0250m.QC	Banda espectral da imagem de controle de qualidade, produto MODIS versão 5, resolução temporal a cada 8 dias	<i>MODIS/Terra Quality Control 8-Day L3 Global 250m SIN Grid, QC Band</i>

Quadro 3-6: Produtos das bandas das imagens MOD09Q1

sigla_estado character varying(2)	estado character varying(30)
SP	Sao Paulo

Figura 3-20: Exemplo de dados armazenados na tabela *testado*

oid_municipio smallint	sigla_estado character varying(2)	nome character varying(40)
5	SP	Irapua
6	SP	Borborema

Figura 3-21: Exemplo de dados armazenados na tabela *tmunicipio*

cod_produtosig character varying(30)	fill_value integer	min_valid_range integer	max_valid_range integer	scale_factor integer
MOD09Q1.004.0250m.RED	-28672	-100	16000	10000
MOD09Q1.004.0250m.NIR	-28672	-100	16000	10000
MOD09Q1.004.0250m.QC	65535	0	16	1

Figura 3-22: Exemplo de dados armazenados na tabela *tprodutosig*

oid_recorte smallint	lat_supesq real	long_supesq real	lat_infdir real	long_infdir real
1	-20.69	-49.62	-23.23	-47

Figura 3-23: Exemplo de dados armazenados na tabela *trecorte*

oid_microregiao smallint	cod_produtosig character varying(30)	oid_pixelpos smallint	x integer	y integer
1	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	511	301
1	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	511	301
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	511	301
2	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	498	295
2	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	498	295
2	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	498	295
3	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	544	274
3	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	544	274
3	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	544	274

Figura 3-24: Exemplo de dados armazenados na tabela *tpixellocal*

oid_microregiao smallint	oid_municipio smallint	lat_referencia double precision	long_referencia double precision	lat_supesq double precision	long_supesq double precision	lat_infdir double precision	long_infdir double precision
1	4	-21.367265	-49.363868	-21.360526	-49.3751	-21.382989	-49.357129
2	4	-21.351541	-49.397563	-21.342555	-49.406548	-21.362772	-49.388578
3	4	-21.306614	-49.294232	-21.295383	-49.30771	-21.313353	-49.287493
4	4	-21.299875	-49.296479	-21.295383	-49.30771	-21.313353	-49.287493
5	4	-21.304368	-49.296479	-21.295383	-49.30771	-21.313353	-49.287493
6	4	-21.558202	-49.141483	-21.551463	-49.154961	-21.567187	-49.13699
7	4	-21.567187	-49.168439	-21.562695	-49.17967	-21.580665	-49.163946
8	4	-21.569433	-49.170685	-21.562695	-49.17967	-21.580665	-49.163946
9	4	-21.576172	-49.145975	-21.567187	-49.157207	-21.582911	-49.141483
10	4	-21.61436	-49.13699	-21.605375	-49.150468	-21.623345	-49.134744

Figura 3-25: Exemplo de dados armazenados na tabela *tmicroregiao*

oid_microregiao smallint	cod_produtosig character varying(30)	oid_recorte smallint	qt_colunas_imagem_recorte integer	qt_linhas_imagem_recorte integer	referencia_oid_pixelpos smallint
1	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	1936	1131	8
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	1936	1131	8
1	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	1936	1131	8
2	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	1936	1131	1
2	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	1936	1131	1
2	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	1936	1131	1
3	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	1936	1131	2
3	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	1936	1131	2
3	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	1936	1131	2

Figura 3-26: Exemplo de dados armazenados na tabela *tmicroregiao_tprodutosig*

oid_microregiao smallint	oid_talhao smallint
1	1
1	2
1	3
1	4
1	5
1	6
1	7
1	8
1	9
1	10
2	11
2	12
2	13

Figura 3-27: Exemplo de dados armazenados na tabela *tmicroregiao_ttalhao*

Através de uma simples consulta aos dados contidos no banco de dados, através da linguagem SQL-92 (*Structured Query Language*), é possível obter quantos *pixels* estão associados a uma

determinada micro-região e a uma determinada banda da imagem, conforme comando exemplificado a seguir. Neste comando, *count(*)* retorna a quantidade de registros existentes no banco de dados, *oid_microregiao=1* restringe o resultado da consulta para o identificador da primeira micro-região e *cod_produtosig='MOD09Q1.004.0250m.RED'* restringe o resultado da consulta somente a banda do vermelho.

```
SELECT count(*)
FROM bdregiao.tpixellocal
WHERE oid_microregiao=1 AND
      cod_produtosig='MOD09Q1.004.0250m.RED';
```

Outra combinação de comando de consulta SQL-92 ao esquema nomeado *Região*, a fim de obter quais são os talhões de cana-de-açúcar relacionados a uma determinada entidade micro-região, é exemplificada abaixo. Neste comando, os identificadores dos talhões são obtidos para o *oid_microregiao=1*, o qual restringe o resultado da consulta para o identificador da primeira micro-região.

```
SELECT oid_talhao
FROM bdregiao.tmicroregiao_ttalhao
WHERE oid_microregiao=1;
```

O algoritmo para a seleção dos *pixels* associados aos talhões de cana-de-açúcar e armazenamento destes no banco de dados é descrito no Quadro 3-7.

No aplicativo ENVI, criar uma máscara imagem, em preto e branco, a partir dos vetores de talhões de cana-de-açúcar desejados;

No aplicativo ENVI, para cada conjunto de talhões, com características semelhantes, que caracterizam um agrupamento denominado micro-região, faça:

- Extrair a localização dos pixels pertencentes a micro-região, de acordo com os critérios descritos na Fase 2;
- Salvar a localização dos pixels pertencentes a micro-região no banco de dados, esquema Região;

Quadro 3-7: Algoritmo para a seleção dos *pixels* e armazenamento destes no banco de dados

3.2.4 Fase 3 – Construção do banco de dados referente aos dados dos Pixels

As imagens do sensor MODIS, satélite TERRA, na resolução temporal de 8 dias, correspondentes ao produto MOD09Q1, são disponibilizadas pela NASA aos usuários com calibração radiométrica, correção atmosférica, georreferenciamento e normalização radiométrica.

Previamente à extração dos valores dos *pixels*, um programa (*script*) desenvolvido neste trabalho, executado sobre o aplicativo *MODIS Reprojection Tool*, realiza o recorte da região de estudo (Figura 3-1) sobre toda a série temporal de imagens MODIS, conforme apresentado no Quadro 3-8. O recorte das imagens, a fim de restringir-se a região de estudo, é realizado com o objetivo de reduzir a quantidade de dados a serem processados e, conseqüentemente, obtém-se maior desempenho na extração dos valores dos pixels, devido a redução da exigência computacional requerida para a tarefa.

No aplicativo *MODIS Reprojection Tool*, execute para todas as imagens MODIS da série temporal disponível:

- Para cada arquivo, formato HDF, do produto MOD09Q1, faça:
 - Abrir o arquivo;
 - Realizar a operação de recorte da imagem de acordo com as coordenadas geográficas desejadas;
 - Realizar a operação de reprojeção, para *datum WGS-1984*, projeção Geográfica, unidade graus decimais;
 - Extrair apenas as bandas do vermelho, do infravermelho-próximo e de controle de qualidade e salvar em formato de arquivo Geo-TIFF;
 - Fechar o arquivo;

Quadro 3-8: Algoritmo para o recorte das imagens, reprojeção e extração de bandas

A versão 4 do produto MOD09Q1 apresenta as seguintes características: tamanho aproximado do arquivo de 275 MB, 4800 colunas x 4800 linhas e Projeção Sinudoidal. A versão 5 do produto MOD09Q1 apresenta as seguintes características: tamanho aproximado do arquivo de 65 MB, 4800 colunas x 4800 linhas e Projeção Sinudoidal. Após o recorte das imagens com base na região de estudo do trabalho e na necessidade apenas das bandas do vermelho, infravermelho próximo e de controle de qualidade, cada um dos arquivos de imagem de cada banda na resolução temporal a cada 8 dias é armazenado em formato de arquivo Geo-TIFF

sem compactação, 4,2 MB de tamanho aproximado em disco, contendo 1936 colunas e 1131 linhas, projeção Geográfica LAT/LONG, Datum WGS-84, em graus decimais.

O esquema nomeado *Pixel* é constituído pelas tabelas: *imagem* (Figura 3-28) e *imagem_qc* (Figura 3-29). A tabela *imagem* é responsável por armazenar o valor de cada *pixel* para cada banda da imagem MODIS, e relacioná-lo: ao identificador único da micro-região, ao código do tipo de produto, a um identificador incremental de seqüência do pixel na micro-região e a data da imagem MODIS. A tabela *imagem_qc* é responsável por armazenar os valores de controle de qualidade (*QC*) avaliados posteriormente de cada pixel da banda QC das imagens MODIS. As seguintes características de qualidade do *pixel* são armazenadas na tabela *imagem_qc* para posterior utilização em filtragem dos ruídos: avaliação da qualidade de imageamento da superfície da terra nas bandas do vermelho e do infravermelho-próximo; presença de nuvens; qualidade da correção atmosférica e a qualidade da correção dos efeitos provocados pelos *pixels* da adjacência. Para cada pixel, temporalmente, do produto MOD09Q1 na banda QC, existem 16 bits contendo a caracterização de qualidade do pixel avaliada pelo sensor. Um aplicativo desenvolvido neste trabalho na linguagem de programação JAVA (2008) extraiu os bits, os quais estão descritos no Quadro 3-10, e armazenou na tabela *imagem_qc*. O critério utilizado neste trabalho para ponderar quantitativamente o grau de qualidade do *pixel* é descrito pelo algoritmo do Quadro 3-9.

```

Se (banda selecionada == vermelho)
    bandDataQuality = band1DataQuality;
Senão se (banda selecionada == infravermelho-próximo)
    bandDataQuality = band2DataQuality;

Se (valor do pixel != 2995) {
    Se ( (modlandQA == 0) && (cloudState == 0) && (bandDataQuality == 0) && (atmosphericCorrection == 1) )
        Então pixel apresenta 100% de qualidade;
    Senão se ( (modlandQA == 0) && (cloudState == 0) && (bandDataQuality == 0) )
        Então pixel apresenta 90% de qualidade;
    Senão se ( ((modlandQA == 0) || (modlandQA == 1)) && (cloudState == 0) && (bandDataQuality == 0) )
        Então pixel apresenta 80% de qualidade;
    Senão
        Então pixel apresenta qualidade insuficiente;
}
Senão
    Então pixel apresenta qualidade insuficiente;

```

Quadro 3-9: Critério para determinar a qualidade do pixel com base na banda QC

Bit	Identificador	Possíveis valores
0-1	MODLAND QA	00 -- produto corrigido produzido com qualidade ideal – todas as bandas 01 -- produto corrigido produzido, menos do que a qualidade ideal – alguma ou todas as bandas 10 -- produto corrigido não efetuado devido a cobertura de nuvens – todas as bandas 11 -- produto corrigido não efetuado por outras razões – algumas ou todas as bandas
2-3	estado das nuvens	00 -- claro 01 -- nublado 10 -- parcialmente nublado 11 -- presumidamente claro
4-7	qualidade dos dados da banda 1	0000 -- alta qualidade 1000 -- problema no detector, dado foi copiado do detector da adjacência 1001 -- ângulo zenital solar ≥ 86 graus 1010 -- ângulo zenital solar ≥ 85 and < 86 graus 1011 -- entrada faltante 1100 -- constante interna usada no lugar de dados climatológicos para pelo menos uma constante atmosférica 1101 -- correção fora dos limites 1110 -- dados LIB defeituosos 1111 -- não processado devido a profundidade do oceano ou nuvens
8-11	qualidade dos dados da banda 2	0000 -- alta qualidade 1000 -- problema no detector, dado foi copiado do detector da adjacência 1001 -- ângulo zenital solar ≥ 86 graus 1010 -- ângulo zenital solar ≥ 85 and < 86 graus 1011 -- entrada faltante 1100 -- constante interna usado no lugar de dados climatológicos para pelo menos uma constante atmosférica 1101 -- correção fora dos limites 1110 -- dados LIB defeituosos 1111 -- não processado devido a profundidade do oceano ou nuvens
12	correção atmosférica realizada	0 -- não 1 -- sim
13	correção da adjacência realizada	0 -- não 1 -- sim
14	diferença de órbita a partir de 500 metros	0 -- não 1 -- sim
15	Não usado.	

Quadro 3-10: Parâmetros de controle de qualidade para cada pixel do produto MOD09Q1

oid_microregiao smallint	cod_produtosig character varying(30)	oid_pixelpos smallint	dataimg date	pixel_valor integer
1	MOD09Q1.004.0250m.NIR	1	2004-01-01	4789
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	2004-01-01	4100
1	MOD09Q1.004.0250m.RED	1	2004-01-01	1832
1	MOD09Q1.004.0250m.NIR	2	2004-01-01	4789
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	2	2004-01-01	4100
1	MOD09Q1.004.0250m.RED	2	2004-01-01	1832
1	MOD09Q1.004.0250m.NIR	3	2004-01-01	4841
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	3	2004-01-01	4100
1	MOD09Q1.004.0250m.RED	3	2004-01-01	1794

Figura 3-28: Exemplo de dados armazenados na tabela *imagem*

oid_microregiao smallint	cod_produtosig character varying(30)	oid_pixelpos smallint	dataimg date	modland_qa smallint	cloud_state smallint	band1_data_quality smallint
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	1	2003-01-01	0	0	0
1	MYD09Q1.004.0250m.QC	1	2003-01-01	0	0	0
1	MOD09Q1.004.0250m.QC	2	2003-01-01	0	0	0

Figura 3-29: Exemplo de dados armazenados na tabela *timagem_qc*

A extração dos valores dos *pixels* das bandas do vermelho, do infravermelho-próximo e de controle de qualidade do produto MOD09Q1 nas regiões monitoradas foi realizada de forma automática via programa desenvolvido para este trabalho na linguagem de programação JAVA (2008) para toda a série temporal de dados, conforme algoritmo descrito no Quadro 3-11. No armazenamento de cada pixel de uma determinada imagem no banco de dados temporal, cada tupla inclui um atributo de identificação do tempo em que o pixel foi obtido.

Para cada micro-região, faça:

- Consultar no banco de dados, esquema Região, a localização dos pixels associados a micro-região;
- Para cada período de tempo, resolução temporal de 8 dias, faça:
 - Para cada uma das bandas associadas a data, faça:
 - Abrir o arquivo, formato Geo-TIFF;
 - Extrair os valores dos pixels desejados;
 - Incluir no banco de dados, esquema *Pixel*, os valores dos pixels extraídos;
 - Fechar o arquivo;

Quadro 3-11: Algoritmo para a extração dos valores dos pixels e armazenamento no banco de dados referente ao esquema *Pixel*

3.2.5 Fase 4 – Filtragem dos dados do perfil temporal do NDVI

A filtragem dos dados consiste em remover ruídos caracterizados por *pixels* com valores de NDVI espúrios, de forma a promover uma evolução suave do perfil temporal do NDVI MODIS. Neste trabalho, são considerados ruídos os distúrbios ou deformações bruscas e isoladas temporalmente no comportamento do alvo em estudo (cana-de-açúcar) ao longo do ciclo da cultura no perfil NDVI analisado. Estes ruídos podem ocorrer na evolução do perfil NDVI devido a diversos fatores, tais como a presença de nuvens no imageamento do *pixel*, sombra provocada pelas nuvens nos *pixels* da adjacência, qualidade ruim no imageamento do *pixel* nas bandas do vermelho e do infravermelho-próximo, fumaça, chuva e ventos fortes.

A fim de alcançar uma forma de curva que traduza o comportamento do alvo (cana-soca) em estudo, minimizando a influência de ruídos, as seguintes etapas (Figura 3-15) são empregadas: 1) emprego de um limiar superior (0.92) e inferior (0.20) para o NDVI, determinado para a região de estudo deste trabalho e especificamente para o sensor MODIS, a fim de descartar a influência da saturação do NDVI e do solo/palha; 2) uso da banda de controle de qualidade, a fim de descartar valores com incertezas de qualidade; 3) eliminação de valores discrepantes (*outliers - hikes e drops*), possivelmente provocados por eventos naturais, como o clima, do meio-ambiente ou provocado por fumaça ou por ausência, tal como a indicação de qualidade ruim, de imageamento do *pixel* pelo sensor; e 4) suavização do perfil temporal do NDVI MODIS em cada safra através do filtro *Savitzky-Golay*.

O algoritmo computacional, referente ao aplicativo implementado neste trabalho na linguagem de programação JAVA (2008), que descreve todos os passos realizados para a fase de filtragem dos dados é apresentado no Quadro 3-12.

A Figura 3-30 ilustra os resultados obtidos com a filtragem dos dados na forma de curva do perfil temporal do NDVI para o trabalho. Conforme observado nesta figura, os dados brutos do NDVI são inicialmente caracterizados pela presença de ruídos. A primeira etapa de filtragem consiste em utilizar os dados da banda de controle de qualidade (QC) para capturar ruídos referente a qualidade de imageamento de cada *pixel*. A ilustração *c* da Figura 3-30 mostra uma suavização dos dados utilizando a filtragem por Savitzky-Golay (Savitzky e Golay, 1964), implementada em aplicativo desenvolvido para este trabalho, agregando-se a

esta filtragem também a remoção de valores discrepantes. As correções 1 e 2 identificadas na ilustração *c* da Figura 3-30, resultando na ilustração *d*, correspondem em representar adequadamente o período de corte e o início da fase de estabelecimento do ciclo fenológico da cana-soca, influenciada pela presença de palha no solo, distorcendo os valores de NDVI.

Selecionar do banco de dados Pixel, os valores dos pixels da micro-região; Desconsiderar desta consulta os valores que estão fora dos limiares inferior e superior; Aplicar Filtro da Banda de Controle de Qualidade; Aplicar filtro de valores discrepantes; Aplicar filtro Savitzky-Golay, com 9 coeficientes, para a suavização da forma de curva do perfil temporal do NDVI; Consultar no banco de dados, as datas das imagens que são influenciadas pelo período de corte e início de solo exposto; Corrigir graficamente o formato da curva do perfil temporal do NDVI a fim de eliminar a ocorrência destas influências;
Quadro 3-12: Algoritmo para a fase de filtragem dos dados

A presença de valores discrepantes influencia negativamente na forma de curva pela técnica de suavização dos dados pelo filtro *Savitzky-Golay*. Para a identificação de valores discrepantes, uma janela temporal de tamanho 3 percorre os valores de NDVI de uma safra de cana-soca e ao identificar uma variação significativa no valor corrente analisado em função dos dados anteriores, do ciclo fenológico da cultura e da tendência dos próximos valores, descarta-se o dado corrente caso este apresente uma variação percentual superior a 20% no valor NDVI no período de 8 dias, tempo entre uma imagem e outra neste trabalho. Este dado descartado é classificado como um valor contendo ruído, provavelmente provocado por algum fenômeno natural pontual naquela data de imageamento, e não é atribuído destaque para fins de análise do perfil NDVI ao longo do ciclo fenológico de uma safra da cana-de-açúcar. Como a data de corte é um dado que é conhecido devido a ser obtido da usina de cana-de-açúcar, é possível temporalmente detectar variações representativas nos valores individuais dos *pixels*, na data de imageamento anterior e posterior à data de corte da cultura da cana-de-açúcar. A partir da variância entre os pixels dos valores NDVI no período referente a data anterior e a data posterior entre a data de corte, é possível identificar quantos dias, efetivamente, a composição

NDVI dos talhões agrupados em uma determinada micro-região foram influenciados durante o corte da cana-de-açúcar.

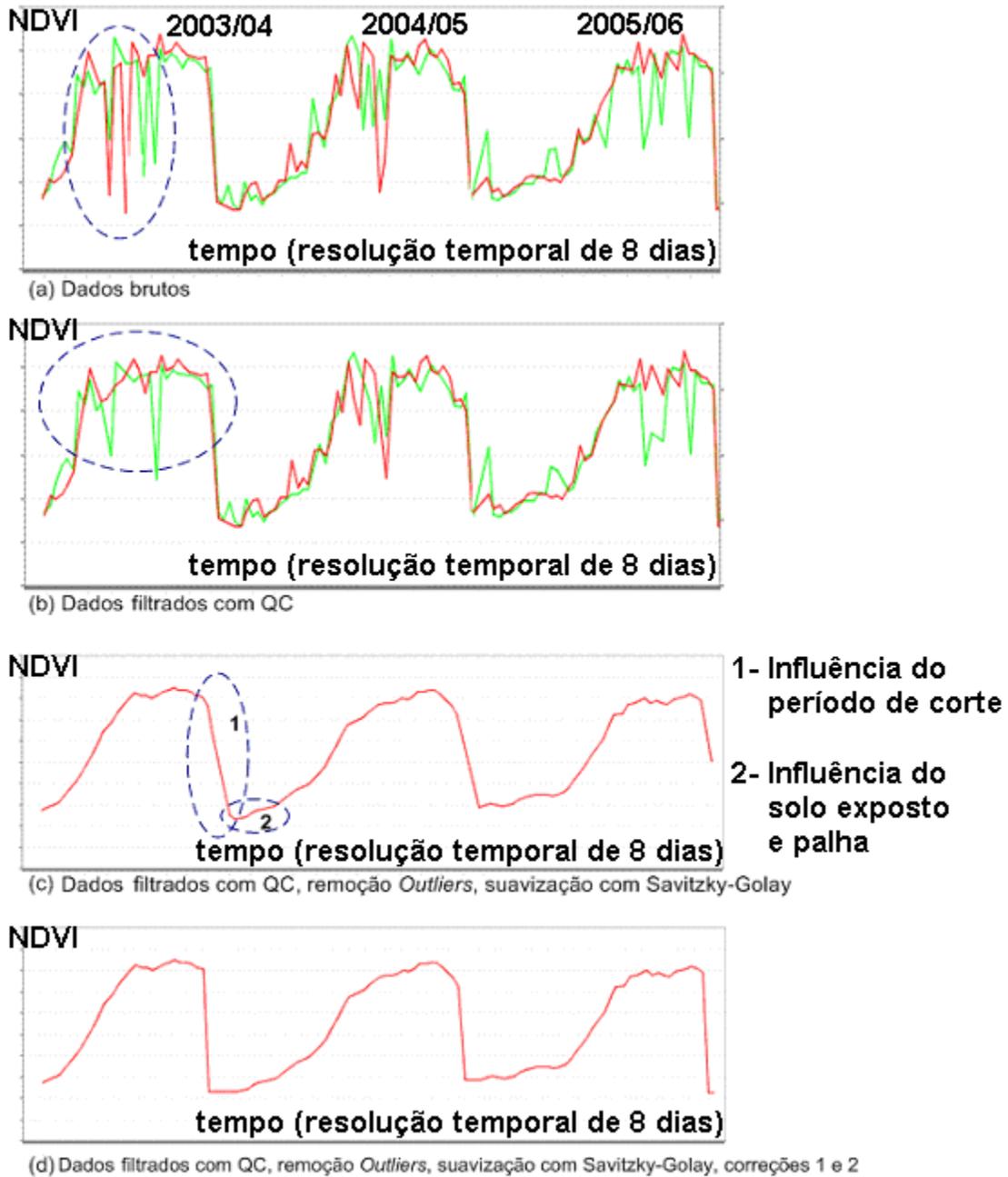


Figura 3-30: Etapas realizadas na suavização de ruídos presentes no perfil temporal do NDVI na resolução temporal de oito dias

3.2.6 Fase 5 – Construção das formas de curvas do perfil temporal do NDVI

A exibição gráfica do perfil temporal do NDVI MODIS, conforme ilustrado na Figura 3-31, para uma determinada safra e em uma determinada micro-região, é realizada de forma automática por meio de programa desenvolvido no trabalho em linguagem de programação JAVA (2008), a partir dos dados contidos no banco de dados do esquema nomeado *Pixel*, bandas do vermelho, do infravermelho-próximo e de controle de qualidade do produto MOD09Q1. A arquitetura do aplicativo *cliente/servidor* ilustrada na Figura 3-32 compreende o aplicativo utilizado para a visualização dos dados contendo o módulo de visualização gráfica, o módulo de filtragem de ruídos e suavização da forma de curva e o módulo de acesso aos dados do banco de dados, e o sistema gerenciador de banco de dados relacional PostgreSQL, o qual armazena o banco de dados do trabalho. A composição do produto NDVI a partir dos dados armazenados no banco de dados é realizada a partir dos critérios: 1) limiar superior 0,92 e inferior 0,20 para o NDVI; e 2) qualidade dos *pixels* das bandas do vermelho e do infravermelho-próximo identificada na banda de controle de qualidade como ausente de ruídos, referente a nuvem, qualidade da correção atmosférica aplicada ao *pixel* e qualidade do imageamento do *pixel*. Neste trabalho não são consideradas as influências da declividade do terreno, da luz solar e do clima tais como a temperatura, precipitação e ventos, as quais podem também influenciar na forma de curva do perfil temporal do NDVI.

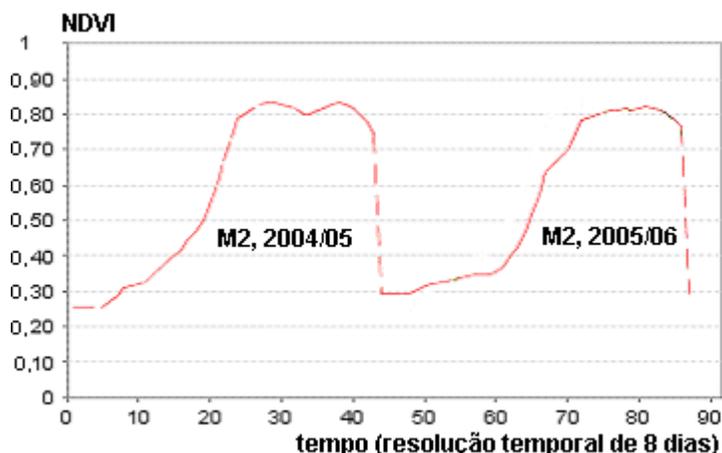


Figura 3-31: Forma de curva do perfil temporal do NDVI para um plantio de cana-de-açúcar em duas safras consecutivas

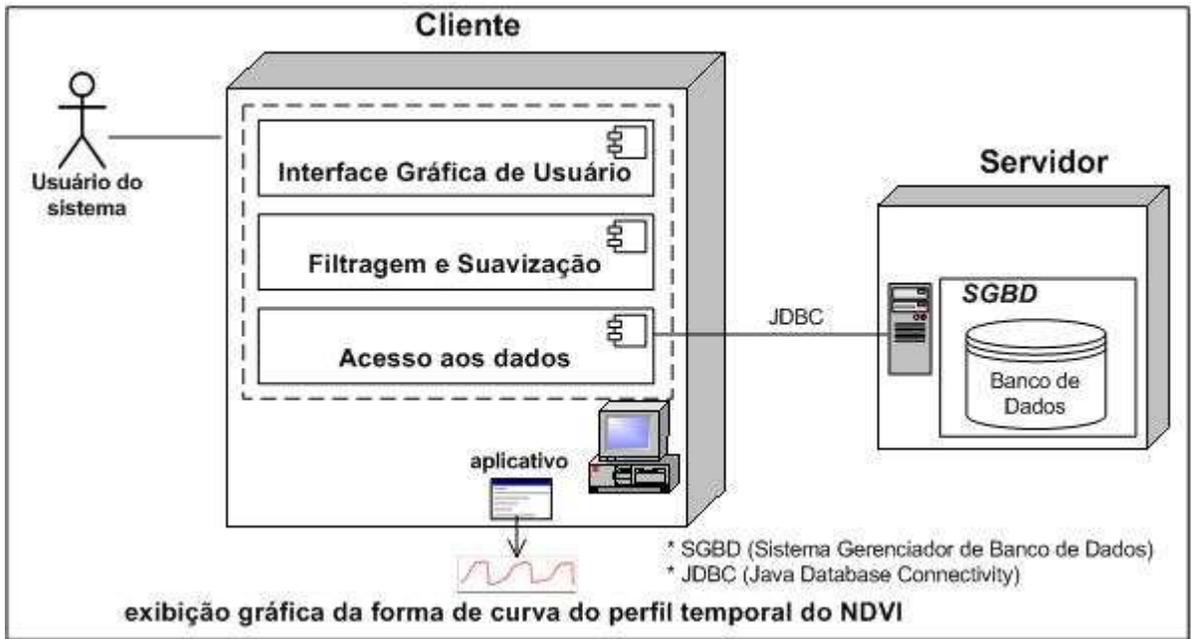


Figura 3-32: Arquitetura do software para a exibição gráfica do perfil temporal do NDVI MODIS

O algoritmo computacional, referente ao aplicativo implementado neste trabalho na linguagem de programação JAVA (2008), o qual descreve todos os passos realizados para a exibição gráfica da forma de curva do perfil temporal do NDVI é apresentado no Quadro 3-13.

ENTRADA:

- Entre com o identificador da primeira micro-região desejada;
- Entre com o ano da safra para a primeira micro-região desejada;
- Entre com o identificador da segunda micro-região desejada;
- Entre com o ano da safra para a segunda micro-região desejada;
- Informar com sim ou não se deseja visualizar o perfil temporal do NDVI com o método de suavização *Savitzky-Golay*;

PROCESSAMENTO:

- Localize no banco de dados quais são os identificadores dos pixels associados a primeira micro-região;
- Localize no banco de dados qual é a data inicial para a primeira micro-região na safra desejada;
- Localize no banco de dados qual é a data final para a primeira micro-região na safra desejada;
- Localize no banco de dados quais são os identificadores dos pixels associados a segunda micro-região;
- Localize no banco de dados qual é a data inicial para a segunda micro-região na safra desejada;
- Localize no banco de dados qual é a data final para a segunda micro-região na safra desejada;
- Para cada micro-região, faça:
 - Para cada **data** cadastrada no banco de dados contendo as imagens das bandas do vermelho e do infravermelho-próximo, pertencente ao intervalo entre as datas inicial e final na safra avaliada, faça:
 - Obtenha os pixels da imagem da banda do vermelho;
 - Obtenha os pixels da imagem da banda do infravermelho-próximo;
 - Determine os valores de NDVI para todos os pixels associados a micro-região;
 - Aplique a filtragem nos valores de NDVI, descartando valores fora dos limiares superior e inferior;
 - Aplique a filtragem nos valores de NDVI, através da banda de controle de qualidade;
 - Determine o valor médio do NDVI entre os pixels e armazene o resultado em uma estrutura de dados do tipo vetor bidimensional, sendo a primeira coluna o valor correspondente a um identificador sequencial incremental e na segunda coluna o resultado do NDVI;
 - Percorra os dados armazenados na estrutura tipo vetor bidimensional e aplique filtragem de dados, através da detecção de valores discrepantes;
 - Exiba graficamente a forma de curva do perfil temporal do NDVI, a partir dos dados armazenados na estrutura tipo vetor bidimensional

Quadro 3-13: Algoritmo para a visualização gráfica da forma de curva do perfil temporal do NDVI

3.2.7 Fase 6 – Interpretação e avaliação das formas de curvas do perfil temporal do NDVI

3.2.7.1 Comparação dos produtos MOD09Q1 das versões 4 e 5

A comparação dos produtos MOD09Q1 das versões 4 e 5 foi realizada neste trabalho a fim de avaliar a similaridade entre as curvas do perfil temporal do NDVI, através do cálculo estatístico da variação percentual entre os valores das formas de curva do perfil temporal do NDVI, devido a descontinuidade de fornecimento pela NASA da versão 4 posterior ao mês de Dezembro de 2007. Desde Janeiro de 2008, apenas a versão 5 está sendo disponibilizada pela NASA e todo o processamento das imagens para o período de Fevereiro de 2000 até Dezembro de 2007 foi concluído e disponibilizado aos usuários no final do mês de Maio de 2008. Nas regiões monitoradas de cana-soca, constatou-se que os produtos MODIS MOD09Q1 das versões 4 e 5 apresentaram alta similaridade na evolução do perfil temporal do NDVI para os três tipos de maturações analisadas e, isto indica que resultados de trabalhos, com a forma de curva do perfil temporal do NDVI deste produto, obtidos com a versão 4, também apresentam forte correlação com a versão 5. Na maturação precoce, ilustrada na Figura 3-33, obteve-se uma variação percentual total entre as formas de curvas de aproximadamente -3,03 %. Na maturação média, ilustrada na Figura 3-34, obteve-se uma variação percentual total entre as formas de curvas de aproximadamente -1,84 %. Na maturação tardia, ilustrada na Figura 3-35, obteve-se uma variação percentual total entre as formas de curvas de aproximadamente -2,27%.

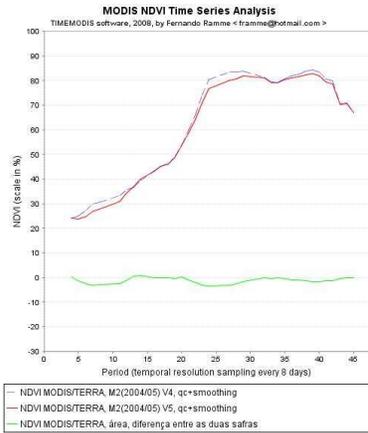


Figura 3-33: Comparação do perfil temporal do NDVI MODIS, Maturação Precoce, Região 02

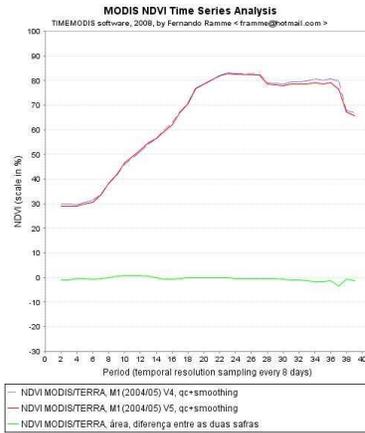


Figura 3-34: Comparação do perfil temporal do NDVI MODIS, Maturação Média, Região 01

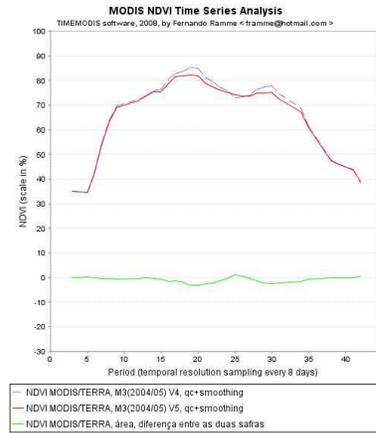


Figura 3-35: Comparação do perfil temporal do NDVI MODIS, Maturação Tardia, Região 03

3.2.7.2 Identificação de janelas de monitoramento nos perfis temporais do NDVI da cana-soca

A identificação de cada janela de monitoramento nos perfis temporais do NDVI da cana-soca foi determinada em função do tipo de maturação da cultura, do coeficiente de cultura (Kc) descrito por Doorenbos e Kassam (1981) e do comportamento na evolução do perfil NDVI. O ciclo fenológico da cana-soca foi caracterizado por 4 fases e 8 estágios, e1, e2, e3, e4, e5, e6, e7, e8, conforme apresentado em detalhes, previamente no Capítulo 2, no Quadro 2-2. A Figura 3-36 ilustra as janelas identificadas na região de estudo deste trabalho para as maturações Precoce, Média e Tardia.

rebrotar ↓					corte ↓	
estabelecimento	perfilhamento	e4 20	formação dos colmos	e7 40	maturação PRECOCE	MODIS 8 dias cana-soca
estabelecimento	perfilhamento	e4 14	formação dos colmos	e7 38	maturação MÉDIA	MODIS 8 dias cana-soca
estabelecimento	perfilhamento	e4 12	formação dos colmos	e7 36	maturação TARDIA	MODIS 8 dias cana-soca

Figura 3-36: Visão simplificada das janelas de monitoramento da cana-soca nas maturações precoce, média e tardia

Os valores de NDVI apresentam maior amplitude na fase de formação dos colmos, onde ocorre grande crescimento vegetativo. A Figura 3-37, ilustra em detalhes, para cada maturação, as fases e os estágios fenológicos, o período de tempo em dias em cada estágio e o identificador seqüencial das imagens MODIS na resolução temporal de 8 dias.

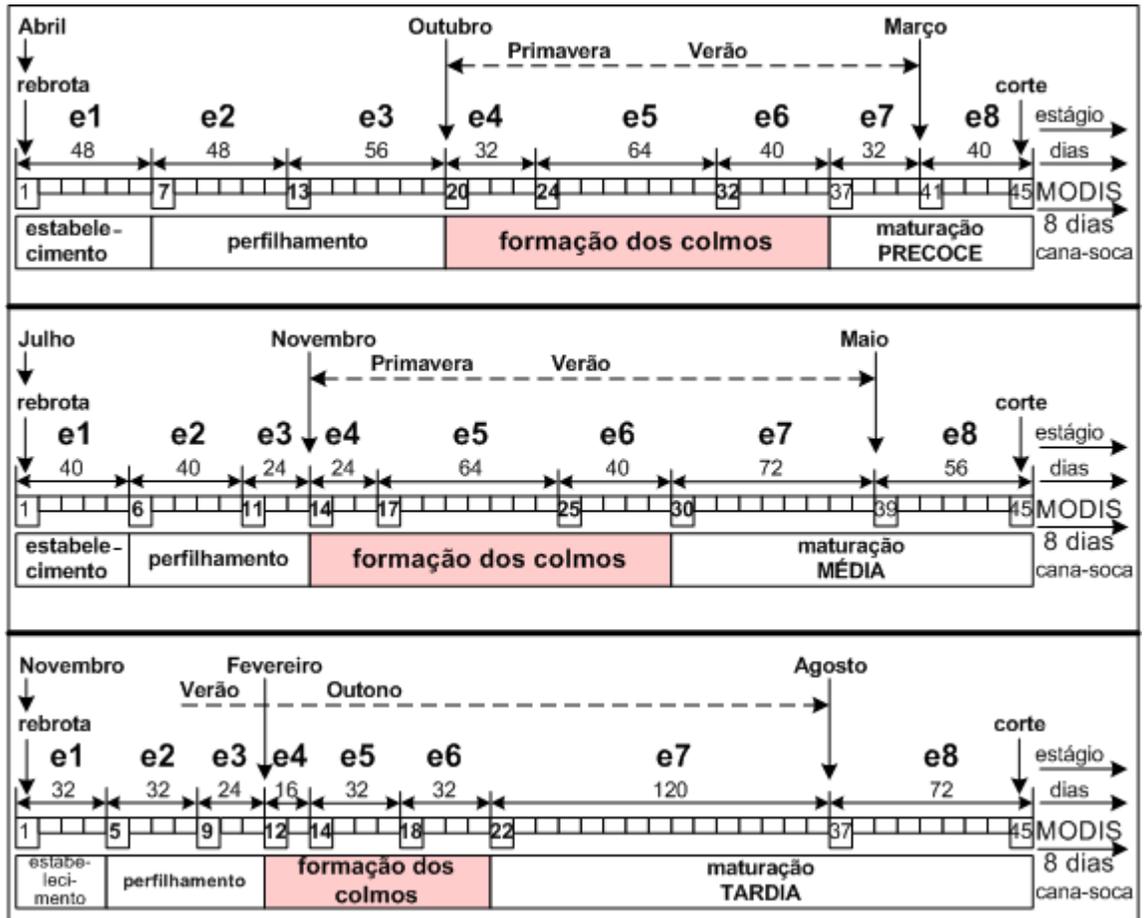


Figura 3-37: Janelas de monitoramento da cana-soca nas maturações precoce, média e tardia

3.2.7.3 Interpretação e avaliação das formas de curvas do perfil temporal do NDVI

A avaliação quantitativa do grau de similaridade entre as formas de curvas do perfil temporal do NDVI foi realizada matematicamente através do cálculo da variação percentual entre as áreas das formas de curvas, por método automático implementado em software desenvolvido neste trabalho, na linguagem de programação JAVA (2008). A avaliação qualitativa do grau de similaridade entre as formas de curvas do perfil temporal do NDVI, a partir do resultado

obtido quantitativamente, foi realizada por interpretação visual, devido a complexidade do comportamento do alvo em estudo, a cultura da cana-de-açúcar, sobre a influência de um conjunto de variáveis ambientais, principalmente o excesso/escassez de água e as variações na temperatura durante todo o ciclo de desenvolvimento do cultivo da cana-soca. Sobre cada assinatura que representa uma determinada safra de uma micro-região é avaliado o formato da curva durante as fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar em função das características observáveis: 1) tipo de maturação; 2) tipo de ambiente caracterizado pelo solo e variedade; 3) produtividade obtida na micro-região; 4) influência do clima sobre a cultura da cana-de-açúcar em função da data de plantio e das datas de corte dos talhões de cana-de-açúcar; 5) estágio do corte da cana-soca; 6) quantidade de dias após o corte em que a assinatura apresentou o ápice do crescimento; 7) indícios de antecipação no amadurecimento da cultura; e 8) indícios de continuidade do crescimento da cultura no período designado para a sua maturação.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

As formas de curvas em perfis temporais do NDVI MODIS foram categorizadas em três maturações, Precoce, Média e Tardia. O ciclo fenológico da cana-soca foi segmentado em quatro fases: 1 – estabelecimento; 2 – perfilhamento; 3 - formação dos colmos; e 4 - amadurecimento, e oito estágios: e1 - rebrota até 0,25% da cobertura vegetal; e2 - 0,25% até 0,50% da cobertura vegetal; e3 - 0,50% até 0,75% da cobertura vegetal; e4 - 0,75% até a cobertura vegetal; e5 - grande crescimento vegetativo; e6 - parte final do crescimento; e7 - início da senescência; e e8 - amadurecimento, conforme apresentado no Capítulo 2, Quadro 2-2 e Figura 2-3.

O período de duração de cada uma das quatro fases foi determinado em função do tipo de maturação da cultura, do coeficiente de cultura (K_c) descrito por Doorenbos e Kassam (1981) e do comportamento na evolução do perfil NDVI, conforme apresentado na metodologia, Capítulo 3, Figura 3-37.

A cana-soca de maturação Precoce apresentou um crescimento lento na fase inicial, período de aproximadamente 50 dias na fase de estabelecimento, 100 dias na fase de perfilhamento, 140 dias na fase de formação dos colmos e 70 dias na fase de amadurecimento. A cana-soca de maturação Média apresentou um período de aproximadamente 40 dias na fase de estabelecimento, 60 dias na fase de perfilhamento, 130 dias na fase de formação dos colmos e 130 dias na fase de amadurecimento. A cana-soca de maturação Tardia apresentou um rápido crescimento na fase inicial, período de aproximadamente 30 dias na fase de estabelecimento, 60 dias na fase de perfilhamento, 80 dias na fase de formação dos colmos e 190 dias na fase de amadurecimento.

4.2 Formas de curvas em perfis temporais do NDVI MODIS de maturação precoce

A Figura 4-1 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Precoce, para a micro-região 2 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo PVA-13 (Quadro 3-1). A variedade é a RB 85-5453, caracterizada pelo crescimento ereto. A safra 2004/05 é de 3º corte, 21 de Maio de 2005, e a produtividade obtida foi de 114,6 ton/ha. A safra 2005/06 é de 4º corte, 7 de Maio de 2006, e a produtividade obtida foi de 86,6 ton/ha. A redução de produtividade é naturalmente esperada entre estes dois estágios. Conforme observado na Figura 4-1, o ápice do crescimento ocorreu a aproximadamente 200 dias após o início da rebrota e o amadurecimento da cultura ocorreu naturalmente na safra 2005/06, seguindo a mesma tendência da safra anterior. Observa-se na Figura 4-1 que o terceiro, quarto e quinto estágios (e3, e4, e5) apresentaram uma maior variação percentual entre as áreas das formas de curvas.

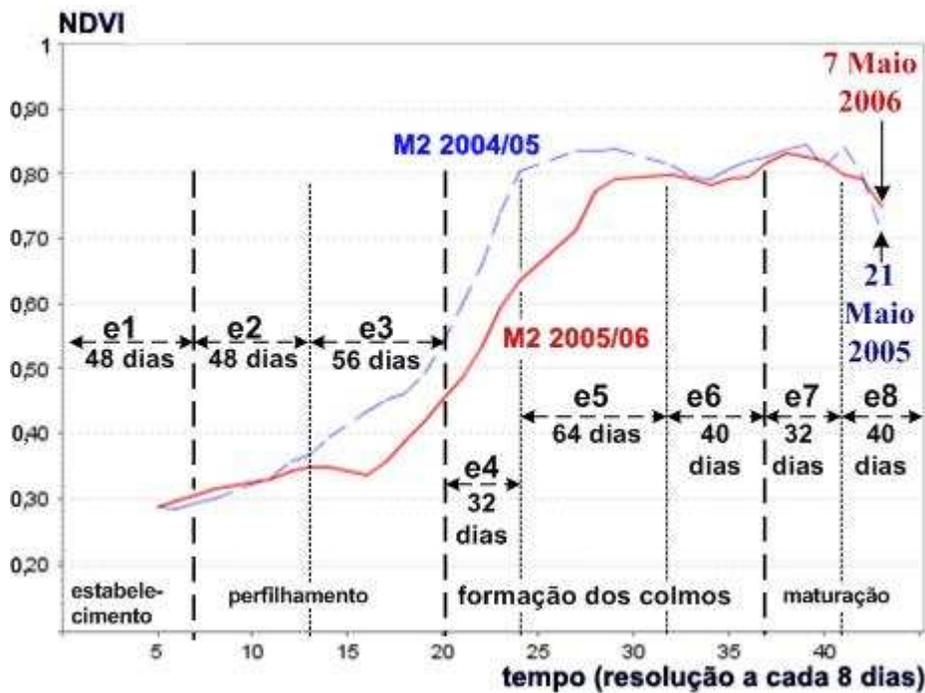


Figura 4-1: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 2

A Figura 4-2 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Precoce, para a micro-região 8 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo PVA-75 (Quadro 3-1). A variedade é a RB 85-5453, caracterizada pelo crescimento ereto. A safra 2004/05 é de 5º corte, 26 de Abril de 2005, e a produtividade obtida foi de 90,2 ton/ha. A safra 2005/06 é de 6º corte, 23 de Abril de 2006, e a produtividade obtida foi de 89,2 ton/ha. Conforme observado na Figura 4-2, o ápice do crescimento ocorreu a aproximadamente 250 dias após o início da rebrota. O perfil temporal do NDVI na safra 2005/06 demonstrou valores um pouco superiores nas fases de estabelecimento, perfilhamento e amadurecimento, possivelmente devido as condições climáticas mais favoráveis, dado que não há mudanças significativas de produtividade entre estes dois cortes.

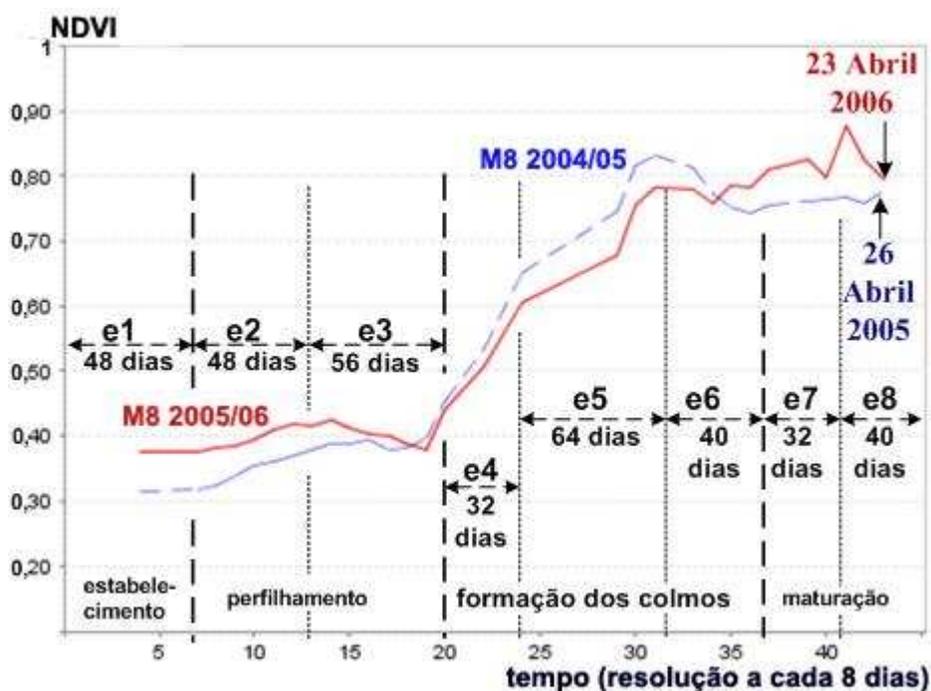


Figura 4-2: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 8

A Figura 4-3 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Precoce, para as micro-regiões 2 e 8. A micro-região 2 possui a variedade RB 85-5453 e a forma de curva representa a safra 2005/06, 4º corte em 7 de Maio de 2006, 86,6 ton/ha, solo do tipo PVA-13 (Quadro 3-1). A micro-região 8 possui a variedade RB 85-5453 e a forma de curva representa a safra 2004/05, 5º corte em 26 de Abril de 2005, 90,2 ton/ha, solo do tipo PVA-75 (Quadro 3-1). Observa-se que os valores do NDVI um pouco superiores na fase de perfilhamento, para a micro-região 8, contribuíram positivamente para um pequeno acréscimo na produtividade, quando comparado a forma de curva do perfil temporal do NDVI para a micro-região 2. Observa-se que apesar de um pequeno decréscimo nos valores do NDVI durante a fase de amadurecimento, para a micro-região 8, esta ocorrência não foi significativa quando comparada a variação na produtividade. Conforme observado na Figura 4-3, o ápice do crescimento para ambas micro-regiões ocorreu a aproximadamente 250 dias após o início da rebrota.

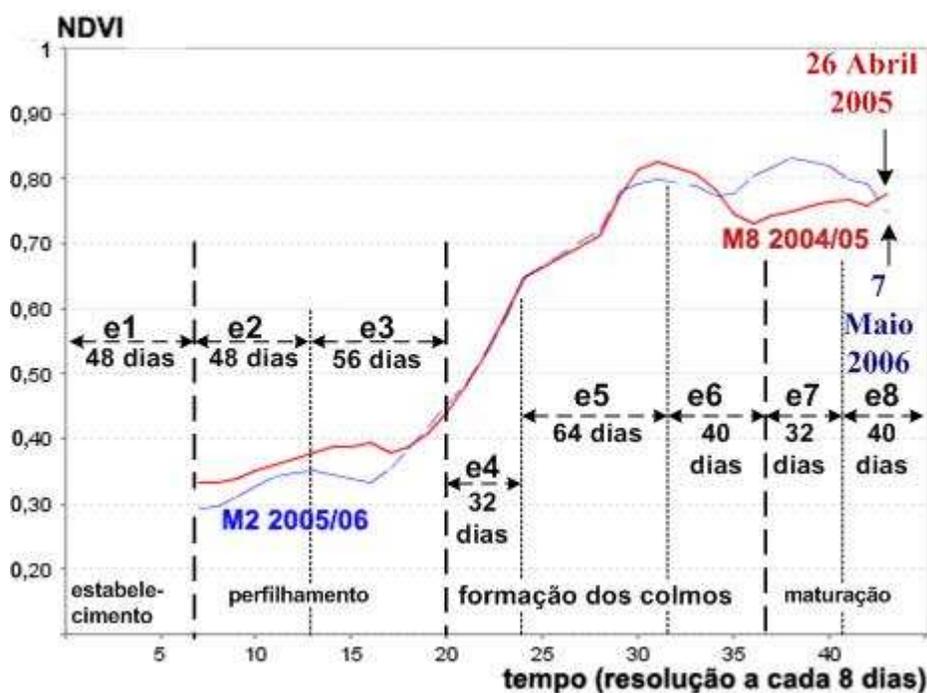


Figura 4-3: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-regiões 2 e 8

A Figura 4-4 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Precoce, para a micro-região 7 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo LVA-9 (Quadro 3-1). A variedade nesta micro-região é a RB 85-5453, caracterizada pelo crescimento ereto. A safra 2004/05 é de 5º corte, 26 de Abril de 2005, e a produtividade obtida foi de 83,0 ton/ha. A safra 2005/06 é de 6º corte, 23 de Abril de 2006, e a produtividade obtida foi de 91,6 ton/ha. A safra 2005/06 apresentou os valores de NDVI mais altos nas fases de estabelecimento, perfilhamento e amadurecimento, quando comparados a safra anterior. A fase de formação dos colmos na safra 2005/06 apresentou os valores de NDVI mais baixos do que na safra anterior. As produtividades obtidas nestas duas safras podem ser explicadas pressupondo-se neste caso, que fatores tais como a luz, temperatura, água e nutrientes presentes no solo e manejo, influenciaram nas diferentes produtividades e afetaram positivamente a produtividade na safra 2005/06. Conforme observado na Figura 4-4, o ápice do crescimento na safra 2004/05 ocorreu a aproximadamente 220 dias após o início da rebrota, e na safra 2005/06 aos 280 dias após o início da rebrota.

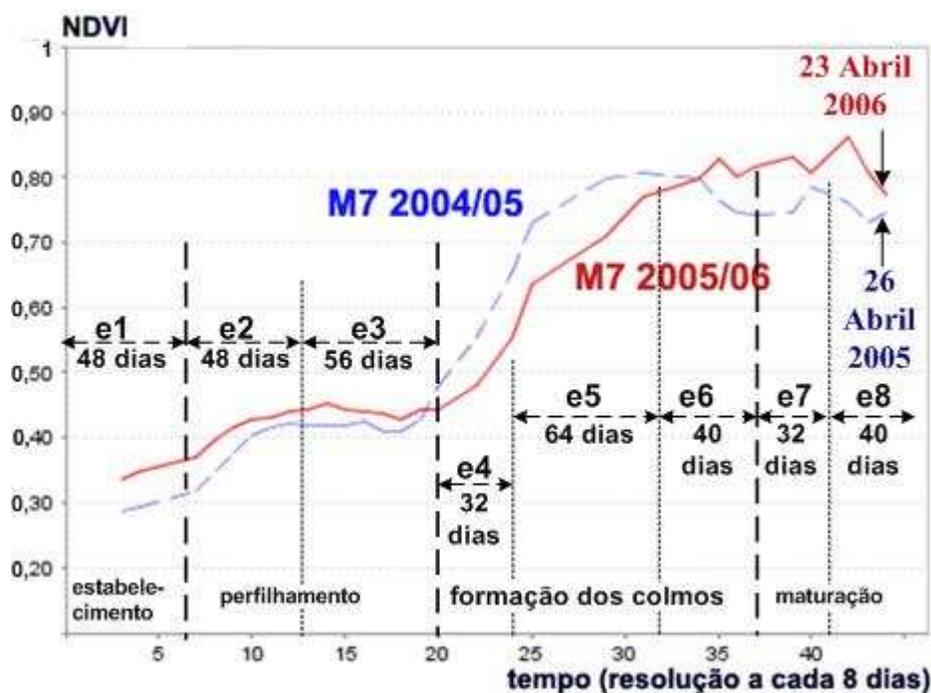


Figura 4-4: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 7

A Figura 4-5 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Precoce, para as micro-regiões 7 e 8. A micro-região 7 possui a variedade RB 85-5453 e a forma de curva representa a safra 2004/05, 5º corte em 26 de Abril de 2005, 83,0 ton/ha, solo do tipo LVA-9 (Quadro 3-1). A micro-região 8 possui a variedade RB 85-5453 e a forma de curva representa a safra 2004/05, 5º corte em 26 de Abril de 2005, 90,2 ton/ha, solo do tipo PVA-75 (Quadro 3-1). A fase de perfilamento apresentou diferença significativa nos valores do NDVI, e pode ser um indicador na diferença entre as produtividades das formas de curvas comparadas. Conforme observado na Figura 4-5, o ápice do crescimento em ambas as safras, ocorreu a aproximadamente 230 dias após o início da rebrota.

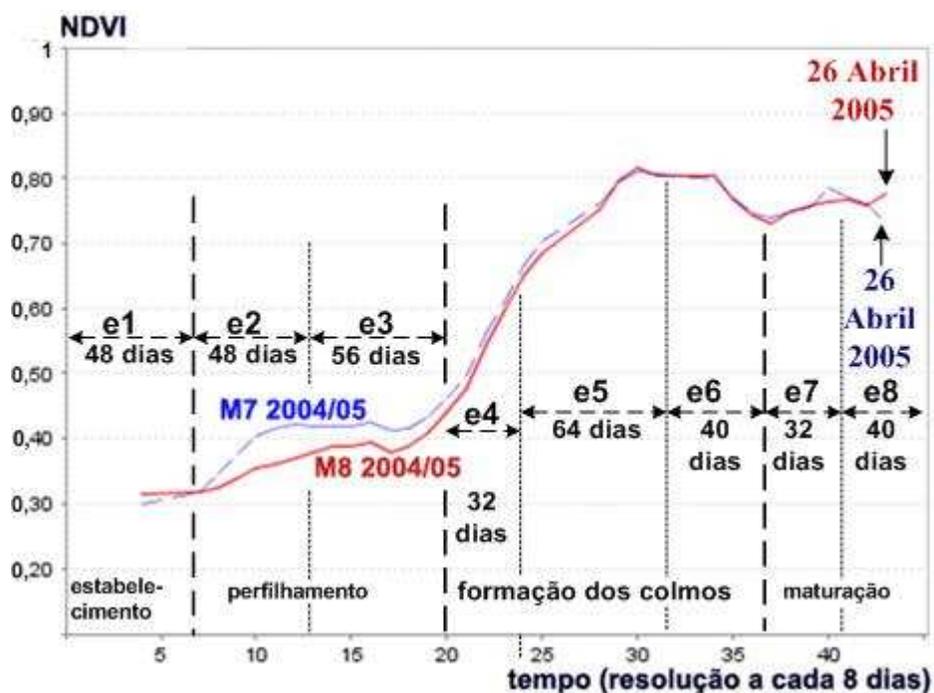


Figura 4-5: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-regiões 7 e 8

4.3 Formas de curvas em perfis temporais do NDVI MODIS de maturação média

A Figura 4-6 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Média, para a micro-região 1 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo LVA-7 (Quadro 3-1). A variedade é a SP 84-1431. Nesta variedade, a ferrugem causa perdas de produtividade e em solos fracos, a cana afina demais e tomba. A safra 2004/05 é de 5º corte em 12 de Maio de 2005 e a produtividade obtida foi de 113,6 ton/ha. A safra 2005/06 é de 6º corte em 13 de Maio de 2006 e a produtividade obtida foi de 114,7 ton/ha. A produtividade superior na safra 2005/06, não esperada, sugere a influência de algum fator que pode ser a condição climática ou o manejo que permitiu a recuperação no perfil temporal do NDVI, sobretudo porque esta ilustra um decréscimo significativo na biomassa da vegetação na fase de formação dos colmos. Mas de qualquer forma a influência foi tal que, mesmo ela apresentando um decréscimo, a curva mostrou uma recuperação intensa na metade do período de formação dos colmos levando a cultura a apresentar, ao final do ciclo praticamente a mesma produção que no ano anterior.

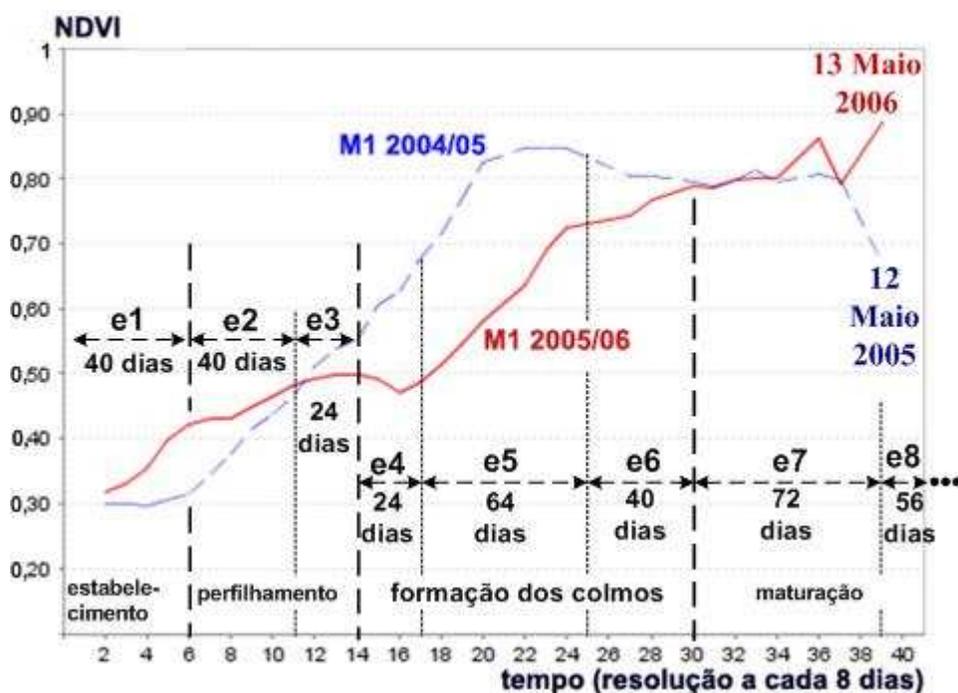


Figura 4-6: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 1

Conforme observado na Figura 4-6, o ápice do crescimento para a safra 2004/05 ocorreu a aproximadamente 150 dias após o início da rebrota, e na safra 2005/06 aos 240 dias após o início da rebrota.

A Figura 4-7 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Média, para a micro-região 10 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo LVA-9 (Quadro 3-1). A variedade é a SP 81-3250, e sofre redução de produtividade em solos pobres sob colheita mecanizada. A safra 2004/05 é de 2º corte em 1 de Agosto de 2005 e a produtividade obtida foi de 96,0 ton/ha. A safra 2005/06 é de 3º corte em 28 de Junho de 2006 e a produtividade obtida foi de 83,0 ton/ha. Devido a caracterização do ambiente de cultivo desta micro-região, baixas produtividades são esperadas. Conforme observado na Figura 4-7, o ápice do crescimento em ambas as safras ocorreu a aproximadamente 190 dias após o início da rebrota. Analisando-se a forma de curva de ambas as safras, observa-se que ocorreu variações nos valores do NDVI em todas as fases da cultura, sendo mais significativas durante o amadurecimento. Pela data de corte da safra 2005/06, totalizando 11 meses, constata-se que possivelmente a vegetação sofreu deficiência hídrica nos meses anteriores, refletindo na resposta espectral da vegetação e, conseqüentemente, na produtividade.

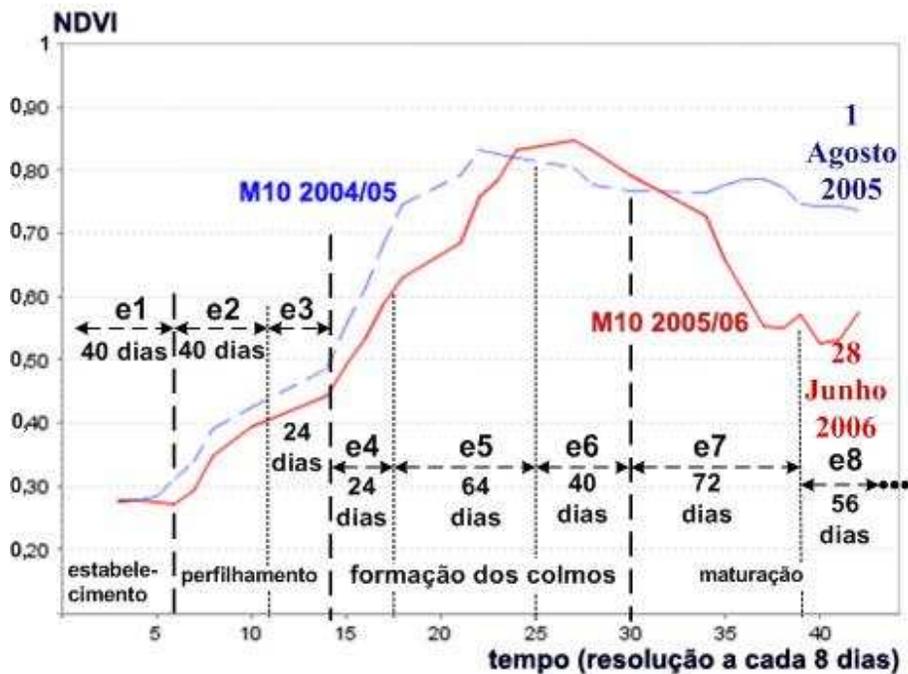


Figura 4-7: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 10

A Figura 4-8 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Média, para as micro-regiões 1 e 10. A micro-região 1 com a variedade SP 84-1431, safra 2004/05, 5º corte em 12 de Maio de 2005, 113,6 ton/ha. A micro-região 10 com a variedade SP 81-3250, safra 2005/06, 3º corte em 28 de Junho de 2006, 83,0 ton/ha. Estas micro-regiões, nas safras analisadas, apresentam diferentes estágios de corte e isto propicia naturalmente diferenças nas produtividades esperadas. Normalmente, em ambientes de cultivo favoráveis para a cana-de-açúcar, é esperado um decréscimo na produtividade em toneladas de cana por hectare para a cultura ao longo da evolução dos estágios de corte. A micro-região 10 apresentou uma produtividade em toneladas de cana por hectare inferior ao esperado para este estágio de corte, quando comparada a micro-região 1 de estágio de corte superior, devido a micro-região 10 estar localizada num solo pobre, o que influenciou negativamente na produtividade em toneladas de cana por hectare obtida. Observa-se na Figura 4-8 que, apesar dos estágios de corte e solos serem diferentes nas micro-regiões analisadas, e influenciarem na forma da curva principalmente na fase de amadurecimento, pode-se inferir que o perfil temporal do NDVI segue uma tendência semelhante quando estágios de corte e produtividades são semelhantes e a cana-soca possui mesmo tipo de maturação.

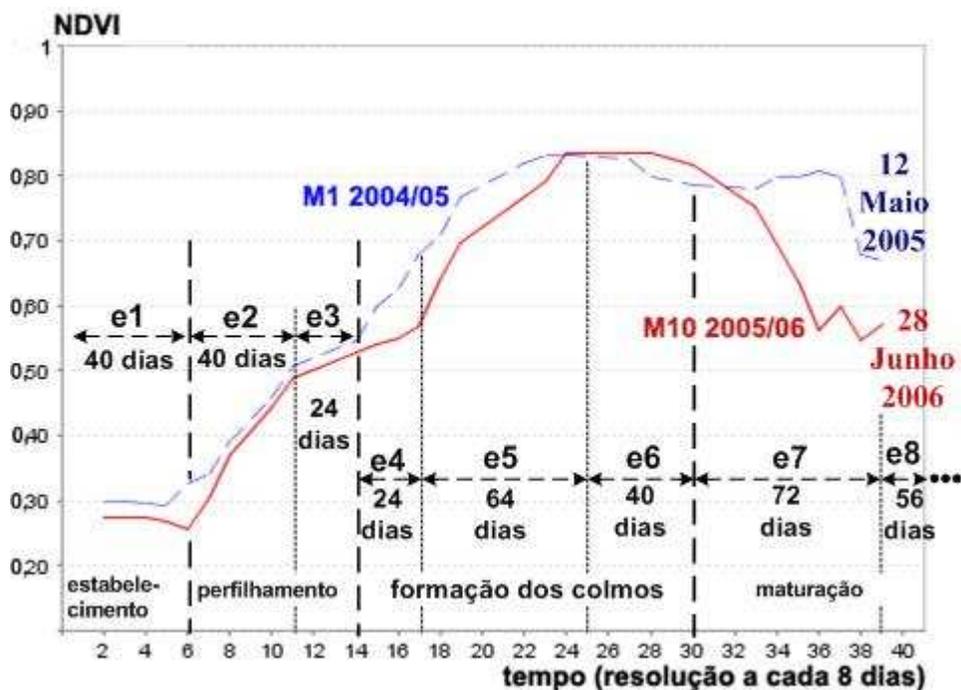


Figura 4-8: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-regiões 1 e 10

4.4 Formas de curvas em perfis temporais do NDVI MODIS de maturação tardia

A Figura 4-9 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Tardia, para a micro-região 3 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo LVA-7 (Quadro 3-1). A variedade é a RB 72-454. A safra 2004/05 é de 2º corte em 29 de Novembro de 2005, 87,6 ton/ha. A safra 2005/06 é de 3º corte em 11 de Novembro de 2006, 60,3 ton/ha. A redução de produtividade é naturalmente esperada entre estes dois estágios. Conforme observado na Figura 4-9, o ápice do crescimento na safra 2004/05 ocorreu a aproximadamente 160 dias após o início da rebrota e na safra 2005/06 aos 110 dias após o início da rebrota.

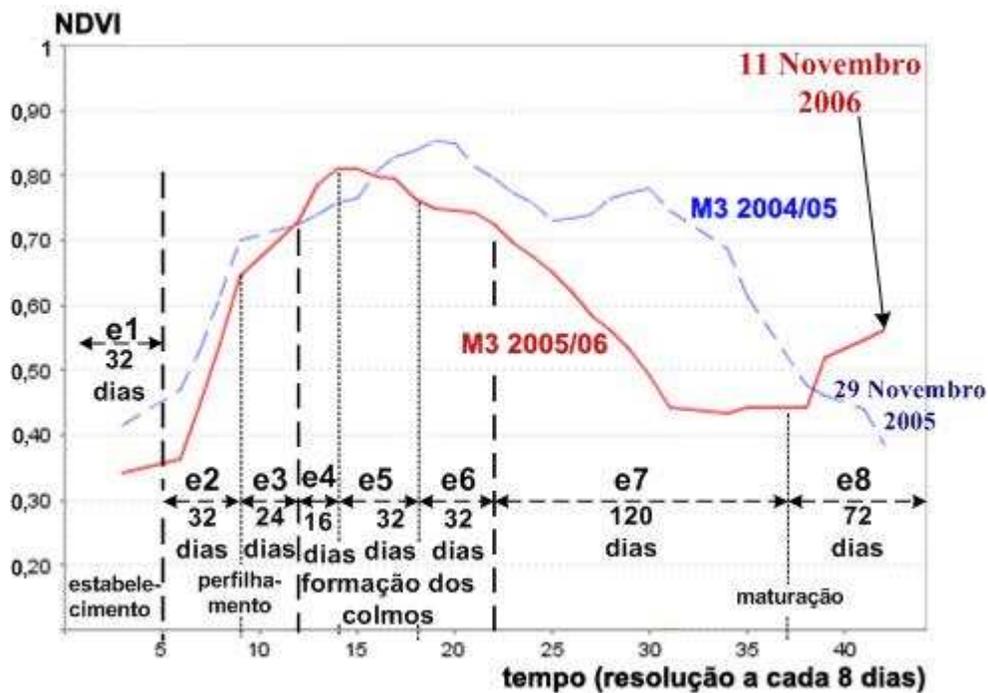


Figura 4-9: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 3

A Figura 4-10 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Tardia, para a micro-região 5 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo LVA-8 (Quadro 3-1). A variedade é a RB 72-454, caracterizada pelo crescimento ereto. A safra 2004/05 é de 2º corte em 28 de Novembro de 2005, 88,2 ton/ha. A safra 2005/06 é de 3º corte em 11 de Novembro de 2006, 62,0 ton/ha. Conforme observado na Figura 4-10, o ápice do crescimento para a safra 2004/05 ocorreu a aproximadamente 160 dias após o início da rebrota e para a safra 2005/06 aos 110 dias após o início da rebrota.

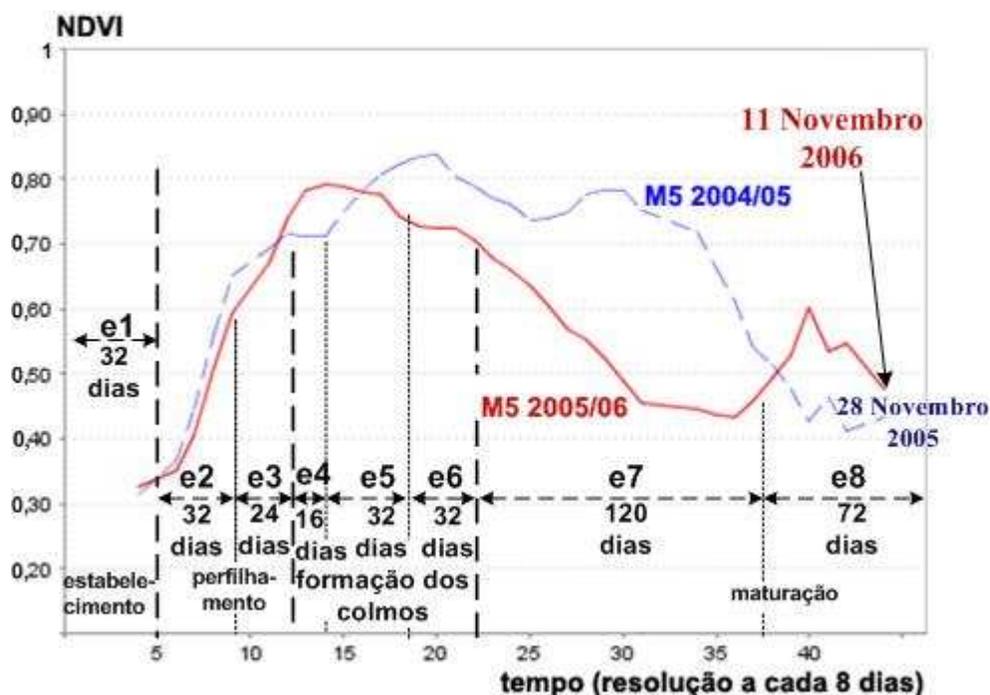


Figura 4-10: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 5

A Figura 4-11 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Tardia, para as micro-regiões 3 e 5. A micro-região 3 possui a variedade RB 72-454, solo do tipo LVA-7 (Quadro 3-1), safra 2005/06 de 3º corte em 11 de Novembro de 2006, 60,3 ton/ha. A micro-região 5 possui a variedade RB 72-454, solo do tipo LVA-8 (Quadro 3-1), safra 2005/06 de 3º corte em 11 de Novembro de 2006, 62,0 ton/ha. Conforme observado na Figura 4-11, o ápice do crescimento para ambas as safras ocorreu a aproximadamente 110 dias após o início da rebrota. Nestas formas de curvas comparadas, significativamente semelhantes, apesar de apresentarem solos diferentes, isto não influenciou significativamente no perfil temporal do NDVI.

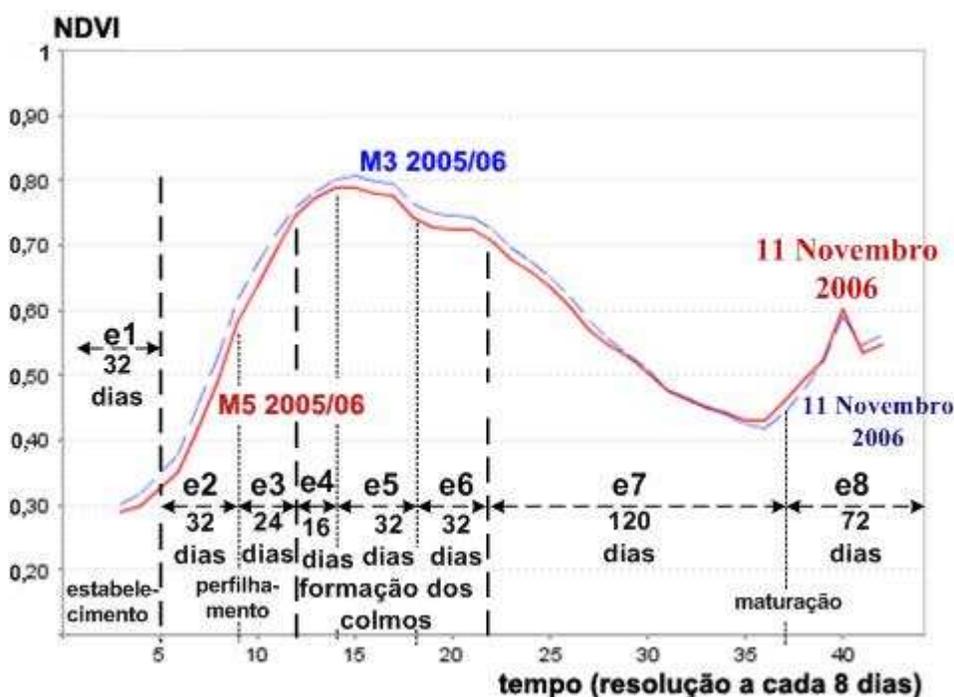


Figura 4-11: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-regiões 3 e 5

A Figura 4-12 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Tardia, para a micro-região 4 nas safras de 2004/05 e 2005/06. O solo desta micro-região é classificado como do tipo PVA-13 (Quadro 3-1). A variedade é a RB 72-454. A safra 2004/05 é de 2º corte em 25 de Novembro de 2005 e a produtividade obtida foi de 84,0 ton/ha. A safra 2005/06 é de 3º corte em 11 de Novembro de 2006 e a produtividade obtida foi de 67,0 ton/ha. Conforme observado na Figura 4-12, uma significativa variação percentual entre as áreas das formas de curvas ocorreu durante a fase de amadurecimento. O ápice do crescimento na safra 2004/05 ocorreu a aproximadamente 160 dias após o início da rebrota e na safra 2005/06 aos 140 dias após o início da rebrota.

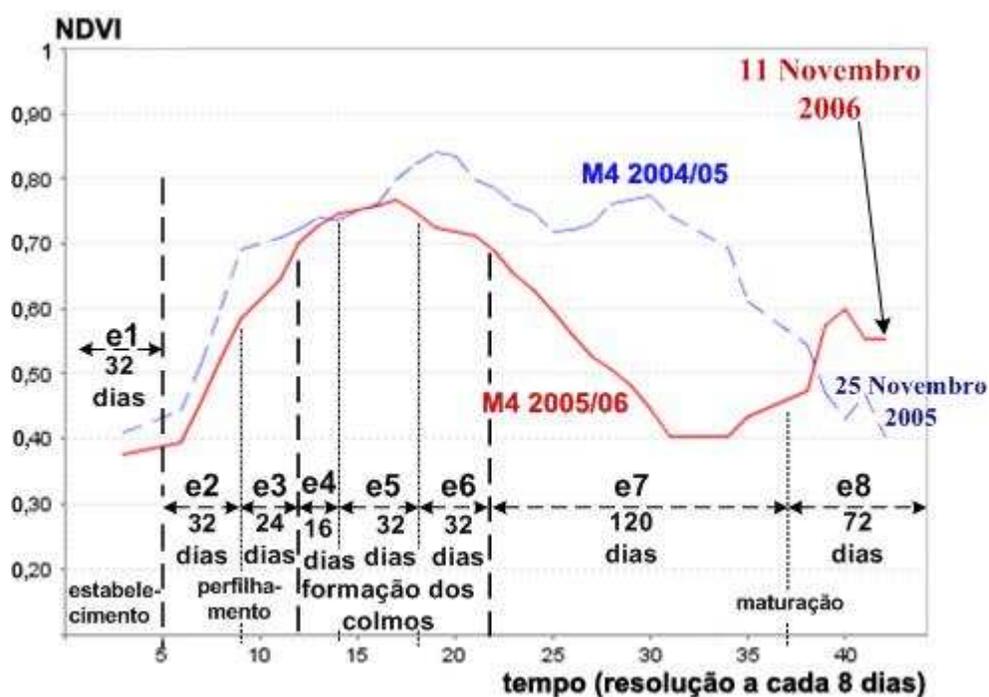


Figura 4-12: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-região 4

A Figura 4-13 ilustra a forma de curva do perfil temporal do NDVI de maturação Tardia, para as micro-regiões 6 e 9. A micro-região 6 possui a variedade SP 83-2847, safra 2005/06, 2º corte em 21 de Agosto de 2006, 90,0 ton/ha. A micro-região 9 possui a variedade RB 72-454, safra 2005/06, 2º corte em 5 de Agosto de 2006, 81,0 ton/ha. Estas micro-regiões apresentam variedades distintas, no entanto, não são significativas do ponto de vista de análise de formato de curva do perfil do NDVI. A combinação de fatores como um solo pobre, uma variedade não resistente as características do solo e deficiência hídrica principalmente na fase de formação dos colmos, pode sim, influenciar significativamente na evolução do perfil temporal do NDVI. Conforme observado na Figura 4-13, o ápice do crescimento em ambas as safras ocorreu a aproximadamente 110 dias após o início da rebrota, e a fase de amadurecimento foi a que apresentou maior variação percentual entre as áreas das formas de curvas.

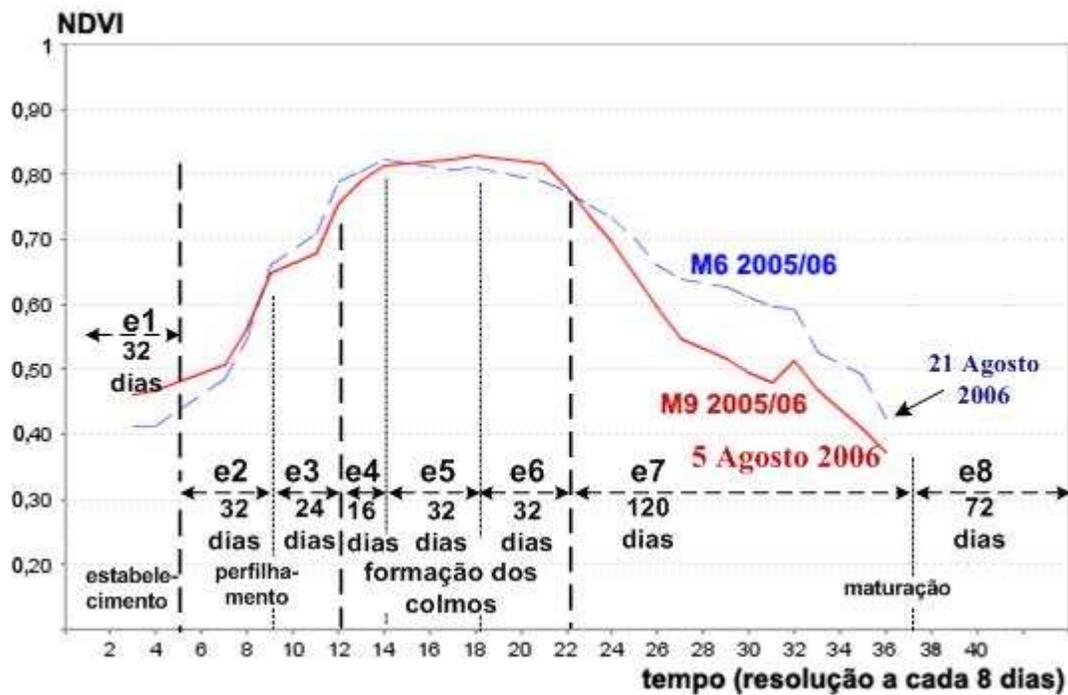


Figura 4-13: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-regiões 6 e 9

4.5 Constatações nas formas de curvas em perfis temporais do NDVI MODIS

4.5.1 Diferentes maturações são caracterizadas por diferentes formas de curvas

Conforme ilustrado na Figura 4-14 e de acordo com as características das micro-regiões de estudo neste trabalho, ficou constatado que diferentes maturações são caracterizadas por diferentes formas de curvas do perfil temporal do NDVI.

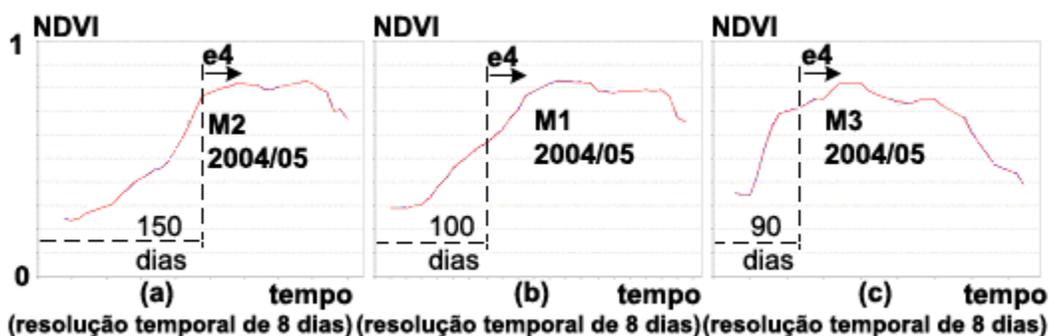


Figura 4-14: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, a) maturação Precoce, b) maturação Média, c) maturação Tardia

4.5.2 Maturações iguais, períodos de rebrota e corte semelhantes, e produtividades semelhantes, são caracterizadas por semelhantes formas de curvas

Conforme ilustrado na Figura 4-15 e de acordo com as características das micro-regiões de estudo neste trabalho, ficou constatado que maturações iguais, períodos de rebrota e corte semelhantes entre as formas de curvas e, produtividades semelhantes, apresentam semelhantes formas de curvas do perfil temporal do NDVI.

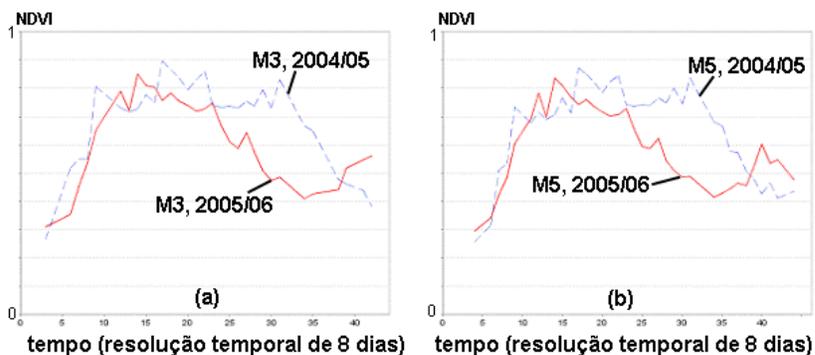


Figura 4-15: Forma de curva do perfil temporal do NDVI, micro-regiões 3 e 5

Capítulo 5

CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

5.1 Conclusões

Ao término deste trabalho, constatou-se nas regiões de cana-de-açúcar (cana-soca) monitoradas em escala local - talhões, que diferentes maturações são caracterizadas por diferentes formas de curvas do perfil temporal do NDVI. Verificou-se que maturações iguais, períodos de rebrota e corte semelhantes entre as formas de curvas e, produtividades semelhantes, apresentam semelhantes formas de curvas do perfil temporal do NDVI. Observou-se nos dados analisados que diferentes variedades, solos e estágios de corte, influenciam na forma de curva do perfil temporal do NDVI, sendo mais visualmente perceptível na medida em que estas diferenças são combinadas.

5.2 Contribuições

São contribuições deste trabalho, descritas previamente na metodologia, os seguintes itens: 1) o projeto e a implementação do banco de dados, em detalhes no Anexo B; 2) o aplicativo para o recorte das imagens, extração de bandas e reprojeção; 3) o aplicativo para a extração dos pixels das bandas das imagens; 4) o aplicativo para a extração dos bits da banda de controle de qualidade; 5) o aplicativo para a exibição gráfica das formas de curvas dos perfis temporais do NDVI MODIS; e 6) a identificação de janelas temporais do ciclo de desenvolvimento da cana-soca nas maturações precoce, média e tardia.

Capítulo 6

TRABALHOS FUTUROS

Identificar, computacionalmente de forma automática através de um sistema de suporte a decisão, formas de curvas em perfis temporais do NDVI em que a safra da cana-soca de determinada maturação alcançou ótimos rendimentos agrícolas, geralmente associados à adequada disponibilidade hídrica, permite avaliar o grau estimado de redução da produtividade agrícola ao longo do ciclo vegetativo da cultura e assim, medidas corretivas podem ser tomadas na eventual indicação estimada de tendência não satisfatória dos resultados esperados para a cultura. A fim de apoiar a identificação automática de formas de curvas e relacioná-las a diferentes produtividades, modelos de estimativa de produtividade, em toneladas de cana por hectare, baseados em perfis temporais do NDVI, para as maturações precoce, média e tardia necessitam ser desenvolvidos.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, Daniel Alves de. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor MODIS**. 99 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

ANDERSON, Liana Oighenstein; et al. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. INPE-10131-RPQ/752. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

ARICA, Nafiz; VURAL, Fatos T. Yarman. BAS: a perceptual shape descriptor based on the beam angle statistics. **Pattern Recognition Letters**, v. 24, n. 9, p. 1627-1639, 2003.

BECK, Pieter S. A., et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 321-334, 2006.

BRADLEY, Bethany A.; et al. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 137-145, 2007.

CASAGRANDE, Aílto Antonio. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

CASTRO, P. R. C. Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar. **Anais... Simpósio Internacional de Fisiologia da Cana-de-Açúcar**, 2000.

CASANOVA, Marco Antônio; et al.. **Bancos de dados geográficos**. Curitiba: MundoGEO, 2005.

CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. 242 p.

CÂMARA, Gilberto; et al. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CAMARGO, Ana Maria Montragio Pires de; et al. Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias, estado de São Paulo, 2001-2006. **Revista Informações Econômicas**, São Paulo, v. 38, n. 3, 2008.

Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI). **Clima dos Municípios Paulistas: a classificação climática de Koeppen para o estado de São Paulo**. Campinas: CEPAGRI, 2008. Disponível em: < <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html> >. Acesso em: 11 Ago. 2008.

COCK, J. H. Sugarcane growth and development. **Anais...** In: Simpósio Internacional de Fisiologia da Cana-de-açúcar. Piracicaba, STAB, 2001. 1 CD-ROM.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra Brasileira de cana-de-açúcar**: safra 2007/2008, terceiro levantamento, Novembro de 2007. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3lev-cana.pdf> >. Acesso em: 04 Set. 2008.

CRÓSTA, Alvaro Penteadó. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. 4. ed. Campinas: Instituto de Geociências, Unicamp, 2002.

CURRAN, Paul J. **Principles of remote sensing**. New York: Logman, 1986.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. 2 ed. Rome: FAO, 1981. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DILLEWIJN, Cornelis Van. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botânica Co., 1952. 371 p.

EDELWEISS, N.; OLIVEIRA, J. P. M.. **Modelagem de Aspectos Temporais de Sistemas de Informação**. Recife: UFPE-DI, 1994.

ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora. **Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná**. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2007.

ELVIDGE, C. D.; CHEN, Z. **Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices**. Remote Sensing of Environment, v. 54, n.1, p. 38-48, 1995.

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Influence of sun-view geometries on the relationships among vegetation indices, LAI, and absorbed PAR. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Surface and Atmospheric Remote Sensing, Pasadena, 1994. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1994, vol. 3, p.1455-1457.

ENVI. **ENVI user's guide**: the environment for visualizing images. New York: Research System, 2003. 312 p.

FALCÃO, A. X.; STOLFI, J.; LOTUFO R. A. The image foresting transform: theory, algorithms and applications. **Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 26, n. 1, p. 19-29, 2004.

GLASZIOU, K. T.; et al.. Physiology of sugar cane. VII. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, v. 18, p. 53-66, 1965.

GSFC/NASA. **MODIS Sinusoidal Tile Grid from Goddard Space Flight Center / NASA.** Disponível em: < http://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.htm >. Acesso em: 17 jun. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha municipal digital do Brasil:** situação em 1999. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 1 CD-ROM.

JAVA. Java™ 2 Platform, Standard Edition (J2SE). Disponível em: < <http://java.sun.com/javase/> >. Acesso em: 15 Out. 2008.

JÖNSSON, Per; EKLUNDH, Lars. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 1824-1832, 2002.

JÖNSSON, Per; EKLUNDH, Lars. TIMESAT: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 1, p. 833-845, 2004.

KING, Michael D.; et al.. **EOS data products handbook:** TRMM and TERRA data assimilation system. v.1, 2004.

LOBELL, D. B.; ASNER, G. P. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 412-422. 2004.

LU, Xiaoliang; et al. Removal of noise by wavelet method to generate high quality temporal data of terrestrial MODIS products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 10, p. 1-11, 2007.

LUCCHESI, Antônio Augusto. **Ecofisiologia de culturas extrativas:** Cana-de-açúcar, Seringueira; Coqueiro; Dendezeiro e Oliveira. In: CASTRO, P.R.C. & KLUGE R.A. (Coord). Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. p. 13-45.

MACHADO, E. C. Fisiologia da produção da cana-de-açúcar: crescimento. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 56-87.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar.** 115 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas, 1981.

MARCHIORI, Luis Fernando Sanglade. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar.** 275 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), USP, Piracicaba, 2004.

MARIOTE, Leonardo Elias; MEDEIROS, Claudia Bauzer; TORRES, Ricardo da Silva. Diagnosing similarity of oscillation trends in time series. **Proceedings...** International Conference on Data Mining Workshops, p. 643-648, 2007.

MATSUOKA, S. **Botânica e ecofisiologia da cana-de-açúcar**. In: Curso de qualificação em plantas industriais: cana-de-açúcar. Maringá: UFPR/SENAR, 1996. 34 p. (Apostila).

MENENTI, M.; et al. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. **Advances in Space Research**, v. 13, n. 1, p. 233-237, 1993.

MENESES, Paulo Roberto; et al. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001.

MODIS/GSFC/NASA. **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**: technical specifications. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>>. Acesso em Maio de 2005.

MOTTA, José Luis Gaffrée; FONTANA, Denise Cybis; WEBER, Eliseu. Evolução temporal do NDVI/NOAA em áreas cobertas por pixels com proporções variáveis de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n.2, p. 353-369, 2003.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Modis home page. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 12 Abr. 2006.

NETAFIM. **Cultivo da cana-de-açúcar**: morfologia e fenologia. Ribeirão Preto: Netafim Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.sugarcane.crops.com>>. Acesso em: 16 Jun. 2008.

NEW YORK MERCANTILE EXCHANGE (NYMEX). **Histórico do preço médio do barril de óleo cru**: dados de Julho/2005 à Julho/2008. NYMEX, 2008.

PostgreSQL. **PostgreSQL 8.2 documentation**. Disponível em: <<http://www.postgresql.org/>>. Acesso em: 18 Jan. 2008.

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

SAVITZKY, Abraham; GOLAY, Marcel J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SHIMABUKURO, Yosio E.; et al. Dinâmica espectro-temporal MODIS em região de Cerrados e intenso uso agropecuário. **Anais...** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005, INPE, p. 1435-1442.

SHIMABUKURO, Yosio E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SLATER, Philip N. **Remote sensing, optics and optical systems**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1980.

SULSOFT. **Guia do ENVI em português**. São Paulo: SulSoft, 2005.

TURNER et al., 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, p. 52-68, 1999.

USGS/LPDAAC. **Imagens dos satélites MODIS/TERRA e MODIS/AQUA, disponibilizadas por U.S. Geological Survey / Land Processes Distributed Active Archive Center**. Disponível em: < <http://lpdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp>>. Acesso em: 16 Abr. 2007.

WORBOYS, Michael F.; DUCKHAM, Matt. **GIS: a computing perspective**. 2 ed. New York: CRC Press, 2004.

ZHAN, X.; et al. **The 250m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth Observing System**. International Journal of Remote Sensing. Vol. 21, no. 6 & 7, 2000. p. 1433-1460.

ZHANG, Xiaoyang; et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 471-475, 2003.

Anexo A – Regiões Monitoradas no Trabalho

As áreas hachuradas das figuras do Anexo A correspondem aos pixels selecionados para o monitoramento e as linhas representam o contorno dos talhões de cana-de-açúcar.

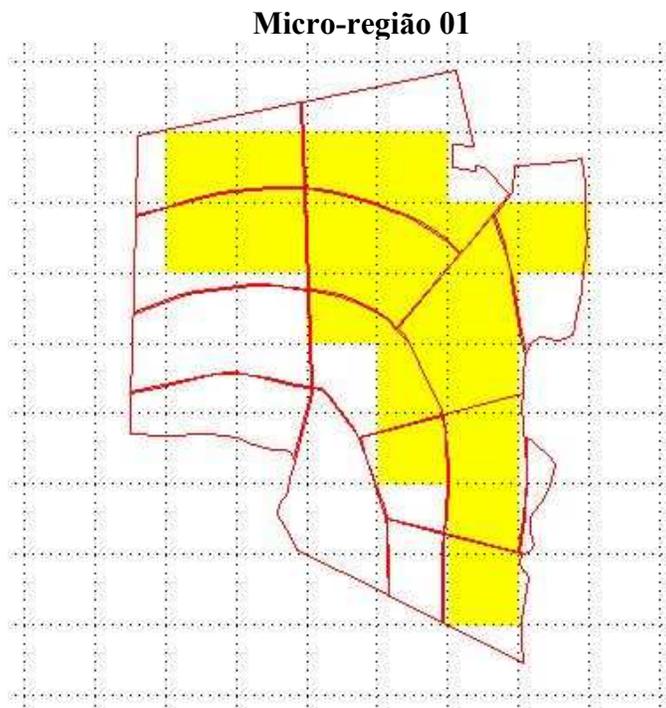


Figura A-1: Pixels selecionados na micro-região 01 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  508  299 -21.360526 -49.375100
  2  516  309 -21.382989 -49.357129

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  511  301 -21.365019 -49.368361
  2  512  301 -21.365019 -49.366115
  3  513  301 -21.365019 -49.363868
  4  510  301 -21.365019 -49.370607
  5  510  302 -21.367265 -49.370607
  6  511  302 -21.367265 -49.368361
  7  512  302 -21.367265 -49.366115
  8  513  302 -21.367265 -49.363868
  9  514  302 -21.367265 -49.361622
 10  515  302 -21.367265 -49.359376
 11  513  303 -21.369511 -49.363868
 12  514  303 -21.369511 -49.361622
 13  512  303 -21.369511 -49.366115
 14  513  304 -21.371757 -49.363868
 15  514  304 -21.371757 -49.361622
 16  514  305 -21.374004 -49.361622
 17  513  305 -21.374004 -49.363868
 18  514  306 -21.376250 -49.361622
 19  514  307 -21.378496 -49.361622
```

Micro-região 02

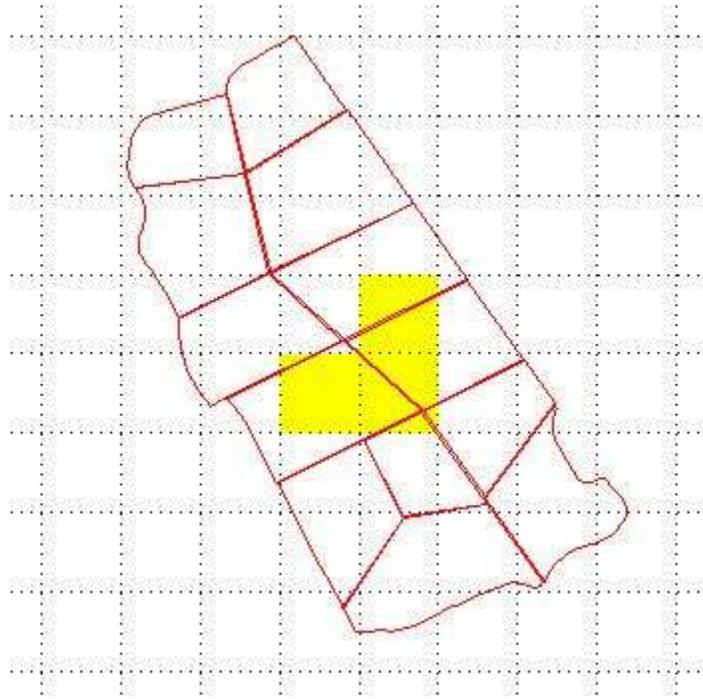


Figura A-2: Pixels selecionados na micro-região 02 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID      X      Y      Lat      Lon
  1  494  291  -21.342555  -49.406548
  2  502  300  -21.362772  -49.388578

; PIXELS
; ID      X      Y      Lat      Lon
  1  498  295  -21.351541  -49.397563
  2  498  296  -21.353787  -49.397563
  3  497  296  -21.353787  -49.399809
```

Micro-região 03

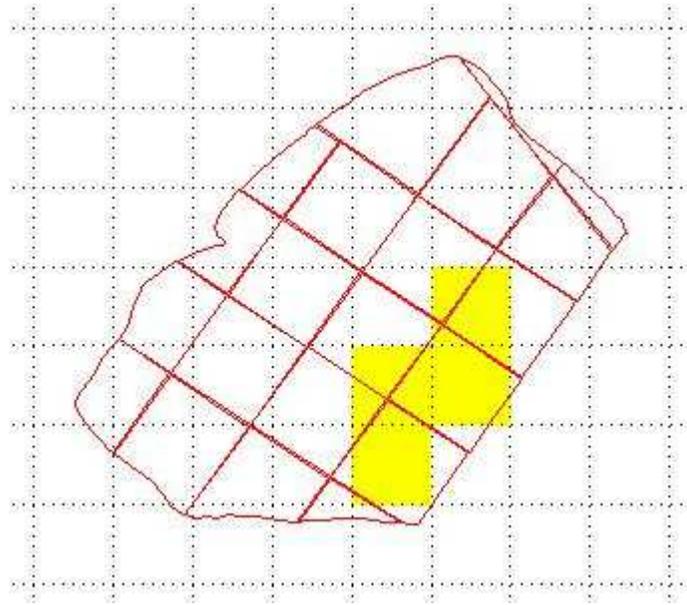


Figura A-3: Pixels selecionados na micro-região 03 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  538  270  -21.295383  -49.307710
  2  547  278  -21.313353  -49.287493

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  544  274  -21.304368  -49.294232
  2  544  275  -21.306614  -49.294232
  3  543  275  -21.306614  -49.296479
  4  543  276  -21.308861  -49.296479
```

Micro-região 04

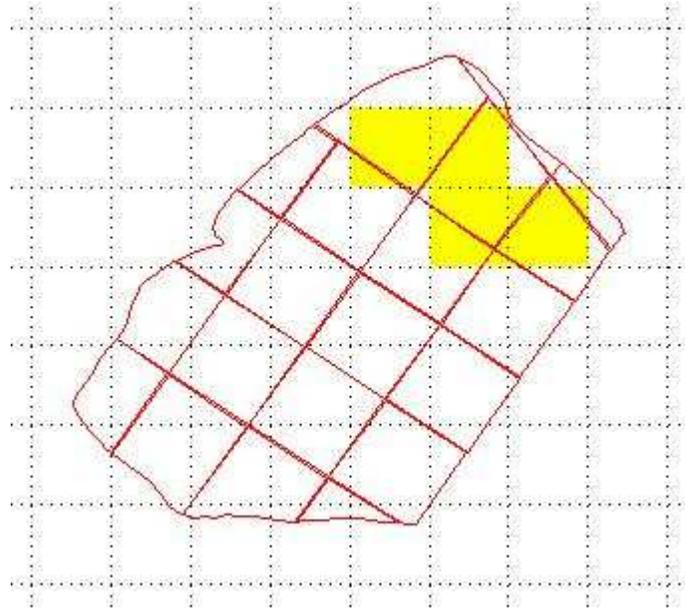


Figura A-4: Pixels selecionados na micro-região 04 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  538  270 -21.295383 -49.307710
  2  547  278 -21.313353 -49.287493

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  544  272 -21.299875 -49.294232
  2  543  272 -21.299875 -49.296479
  3  545  273 -21.302122 -49.291986
  4  544  273 -21.302122 -49.294232
```

Micro-região 05

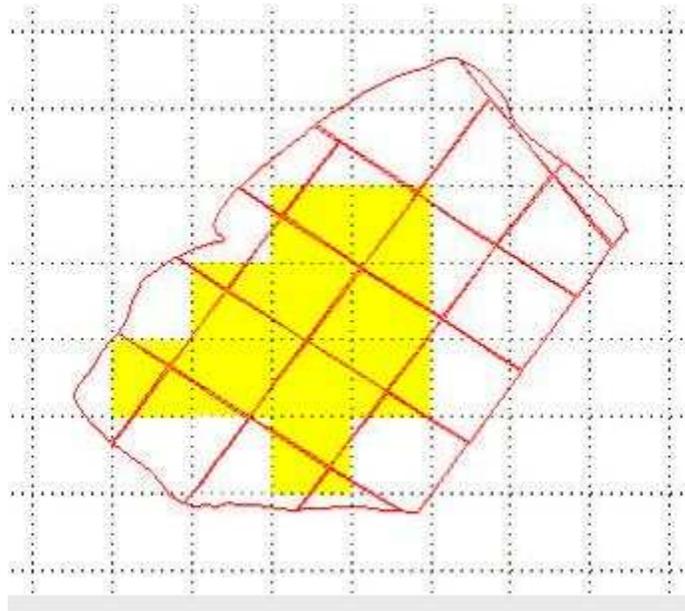


Figura A-5: Pixels selecionados na micro-região 05 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  538  270 -21.295383 -49.307710
  2  547  278 -21.313353 -49.287493

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  543  273 -21.302122 -49.296479
  2  542  273 -21.302122 -49.298725
  3  542  274 -21.304368 -49.298725
  4  543  274 -21.304368 -49.296479
  5  541  274 -21.304368 -49.300971
  6  540  275 -21.306614 -49.303218
  7  541  275 -21.306614 -49.300971
  8  542  275 -21.306614 -49.298725
  9  543  275 -21.306614 -49.296479
 10  542  276 -21.308861 -49.298725
```

Micro-região 06

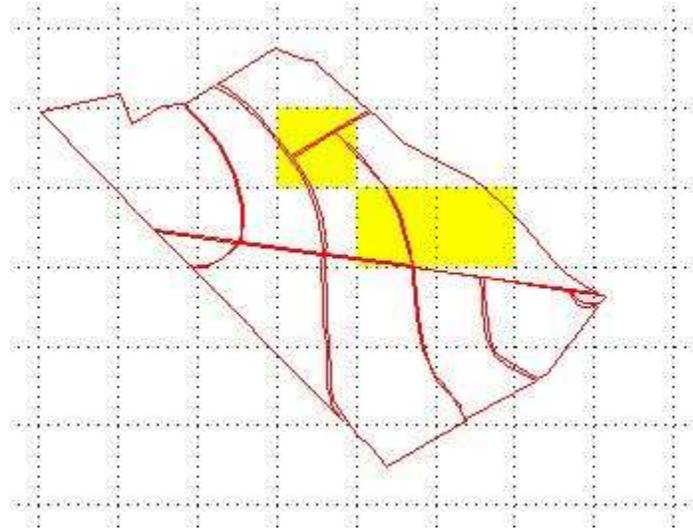


Figura A-6: Pixels selecionados na micro-região 06 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  606  384 -21.551463 -49.154961
  2  614  391 -21.567187 -49.136990

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  610  386 -21.555956 -49.145975
  2  612  387 -21.558202 -49.141483
  3  611  387 -21.558202 -49.143729
```

Micro-região 07

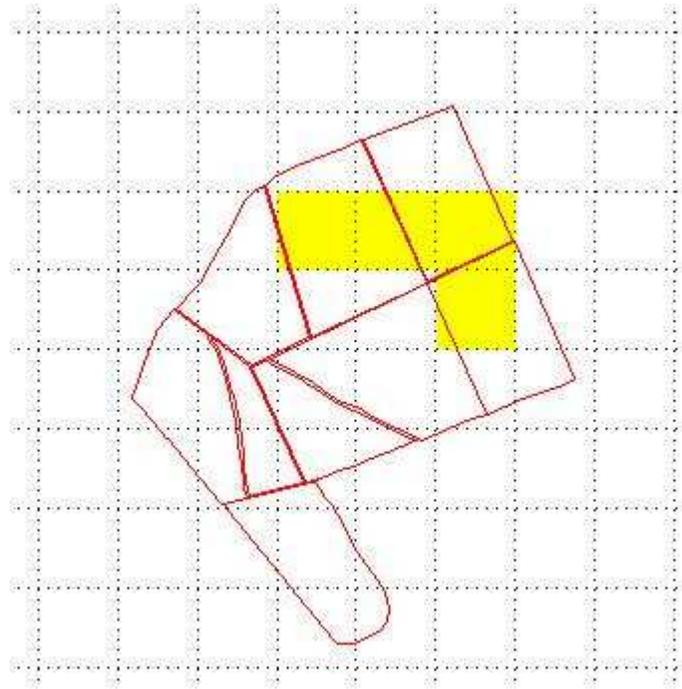


Figura A-7: Pixels selecionados na micro-região 07 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  595  389  -21.562695  -49.179670
  2  602  397  -21.580665  -49.163946

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  599  391  -21.567187  -49.170685
  2  600  391  -21.567187  -49.168439
  3  598  391  -21.567187  -49.172931
  4  600  392  -21.569433  -49.168439
```

Micro-região 08

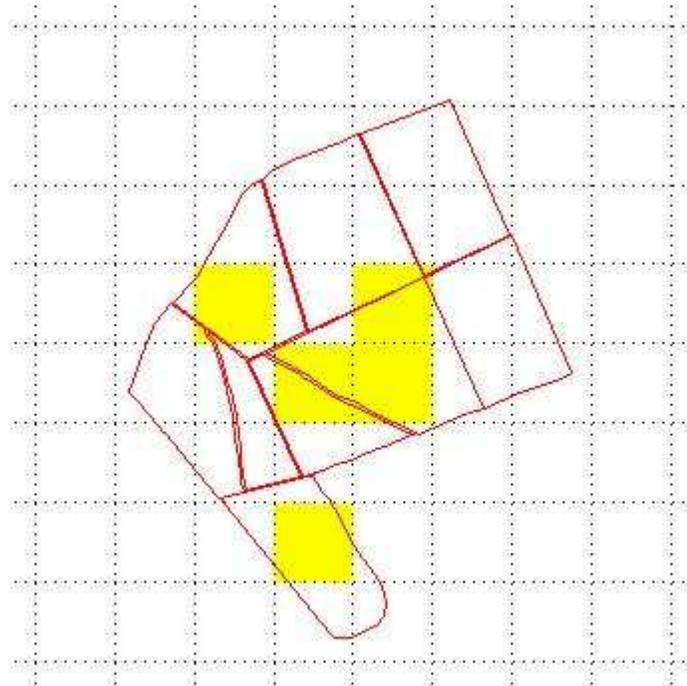


Figura A-8: Pixels selecionados na micro-região 08 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  595  389 -21.562695 -49.179670
  2  602  397 -21.580665 -49.163946

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  599  392 -21.569433 -49.170685
  2  597  392 -21.569433 -49.175178
  3  599  393 -21.571680 -49.170685
  4  598  393 -21.571680 -49.172931
  5  598  395 -21.576172 -49.172931
```

Micro-região 09

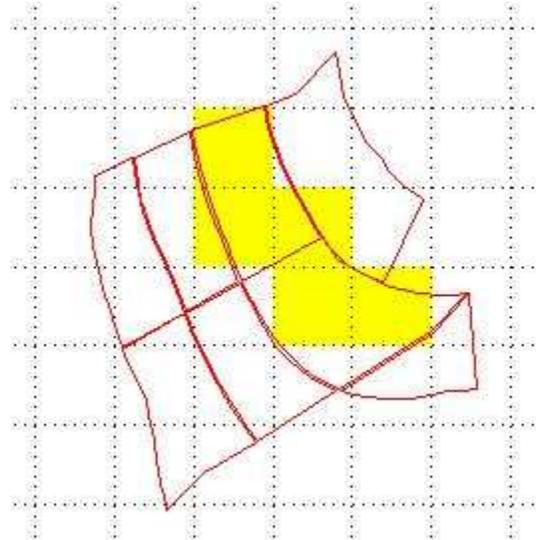


Figura A-9: Pixels selecionados na micro-região 09 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  605  391 -21.567187 -49.157207
  2  612  398 -21.582911 -49.141483

; PIXELS
; ID   X   Y       Lat       Lon
  1  608  393 -21.571680 -49.150468
  2  609  394 -21.573926 -49.148222
  3  608  394 -21.573926 -49.150468
  4  610  395 -21.576172 -49.145975
  5  609  395 -21.576172 -49.148222
```

Micro-região 10

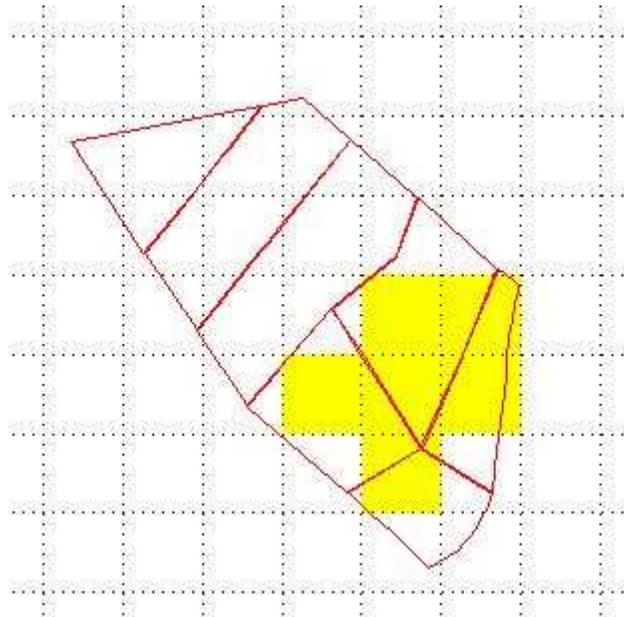


Figura A-10: Pixels selecionados na micro-região 10 monitorada no trabalho

```
; RECORTE
; File Dimension: 1936 x 1131
; ID      X      Y      Lat      Lon
  1  608  408  -21.605375  -49.150468
  2  615  416  -21.623345  -49.134744

; PIXELS
; ID      X      Y      Lat      Lon
  1  614  412  -21.614360  -49.136990
  2  613  412  -21.614360  -49.139237
  3  613  413  -21.616606  -49.139237
  4  614  413  -21.616606  -49.136990
  5  612  413  -21.616606  -49.141483
  6  613  414  -21.618852  -49.139237
```

Anexo B – Bancos de dados desenvolvidos para o trabalho

Esquema bdpixel

```
CREATE SCHEMA bdpixel AUTHORIZATION postgres;
-----
CREATE TABLE bdpixel.timagem (
  oid_microregiao INT2 NOT NULL,
  cod_produtosig VARCHAR(30) NOT NULL,
  oid_pixelpos INT2 NOT NULL,
  dataimg DATE NOT NULL,
  pixel_valor INT4 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdpixel.timagem ADD CONSTRAINT timagem_pk PRIMARY KEY(oid_microregiao,
cod_produtosig, oid_pixelpos, dataimg);
-----

CREATE TABLE bdpixel.timagem_qc (
  oid_microregiao INT2 NOT NULL,
  cod_produtosig VARCHAR(30) NOT NULL,
  oid_pixelpos INT2 NOT NULL,
  dataimg DATE NOT NULL,
  modland_ga INT2 NOT NULL,
  cloud_state INT2 NOT NULL,
  band1_data_quality INT2 NOT NULL,
  band2_data_quality INT2 NOT NULL,
  atmospheric_correction INT2 NOT NULL,
  adjacency_correction INT2 NOT NULL,
  band1_percentage_qc FLOAT4 NOT NULL,
  band2_percentage_qc FLOAT4 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdpixel.timagem_qc ADD CONSTRAINT timagem_qc_pk PRIMARY KEY(oid_microregiao,
cod_produtosig, oid_pixelpos, dataimg);
-----
```

Esquema bdregiao

```
CREATE SCHEMA bdregiao AUTHORIZATION postgres;

-----
CREATE TABLE bdregiao.testado (
  sigla_estado VARCHAR(2) NOT NULL,
  estado VARCHAR(30) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.testado ADD CONSTRAINT testado_pk PRIMARY KEY(sigla_estado);

-----
CREATE TABLE bdregiao.tmunicipio (
  oid_municipio INT2 NOT NULL,
  sigla_estado VARCHAR(2) NOT NULL,
  nome VARCHAR(40) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.tmunicipio ADD CONSTRAINT tmunicipio_fk1 FOREIGN KEY(sigla_estado)
REFERENCES bdregiao.testado(sigla_estado) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tmunicipio ADD CONSTRAINT tmunicipio_pk PRIMARY KEY(oid_municipio);

-----
CREATE TABLE bdregiao.trecorte (
  oid_recorte INT2 NOT NULL,
  lat_supesq FLOAT4 NOT NULL,
  long_supesq FLOAT4 NOT NULL,
  lat_infdir FLOAT4 NOT NULL,
  long_infdir FLOAT4 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.trecorte ADD CONSTRAINT trecorte_pk PRIMARY KEY(oid_recorte);

-----
CREATE TABLE bdregiao.tprodutosig (
  cod_produtosig VARCHAR(30) NOT NULL,
  nome VARCHAR(120) NOT NULL,
  fill_value INT4 NOT NULL,
  min_valid_range INT4 NOT NULL,
  max_valid_range INT4 NOT NULL,
  scale_factor INT4 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.tprodutosig ADD CONSTRAINT tprodutosig_pk PRIMARY KEY(cod_produtosig);

-----
CREATE TABLE bdregiao.tmicroregiao (
  oid_microregiao INT2 NOT NULL,
  oid_municipio INT2 NOT NULL,
  lat_referencia FLOAT8 NOT NULL,
  long_referencia FLOAT8 NOT NULL,
  lat_supesq FLOAT8 NOT NULL,
  long_supesq FLOAT8 NOT NULL,
  lat_infdir FLOAT8 NOT NULL,
  long_infdir FLOAT8 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao ADD CONSTRAINT tmicroregiao_fk1 FOREIGN KEY(oid_municipio)
REFERENCES bdregiao.tmunicipio(oid_municipio) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao ADD CONSTRAINT tmicroregiao_pk PRIMARY KEY(oid_microregiao);

-----
CREATE TABLE bdregiao.tmicroregiao_tprodutosig (
  oid_microregiao INT2 NOT NULL,
  cod_produtosig VARCHAR(30) NOT NULL,
  oid_recorte INT2 NOT NULL,
  qt_colunas_imagem_recorte INT4 NOT NULL,
  qt_linhas_imagem_recorte INT4 NOT NULL,
  referencia_oid_pixelpos INT2 NOT NULL
);
```

```

ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao_tprodutosig ADD CONSTRAINT tmicroregiao_tprodutosig_fk1
FOREIGN KEY(oid_microregiao) REFERENCES bdregiao.tmicroregiao(oid_microregiao) ON DELETE NO
ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao_tprodutosig ADD CONSTRAINT tmicroregiao_tprodutosig_fk2
FOREIGN KEY(cod_produtosig) REFERENCES bdregiao.tprodutosig(cod_produtosig) ON DELETE NO ACTION
ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao_tprodutosig ADD CONSTRAINT tmicroregiao_tprodutosig_fk3
FOREIGN KEY(oid_recorte) REFERENCES bdregiao.trecorte(oid_recorte) ON DELETE NO ACTION ON
UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao_tprodutosig ADD CONSTRAINT tmicroregiao_tprodutosig_pk
PRIMARY KEY(oid_microregiao,cod_produtosig);

```

```

-----
CREATE TABLE bdregiao.tpixellocal (
    oid_microregiao INT2 NOT NULL,
    cod_produtosig VARCHAR(30) NOT NULL,
    oid_pixelpos INT2 NOT NULL,
    x INT4 NOT NULL,
    y INT4 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.tpixellocal ADD CONSTRAINT tpixellocal_fk1 FOREIGN KEY(oid_microregiao)
REFERENCES bdregiao.tmicroregiao(oid_microregiao) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tpixellocal ADD CONSTRAINT tpixellocal_fk2 FOREIGN KEY(cod_produtosig)
REFERENCES bdregiao.tprodutosig(cod_produtosig) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tpixellocal ADD CONSTRAINT tpixellocal_pk PRIMARY
KEY(oid_microregiao,cod_produtosig,oid_pixelpos);

```

```

-----
CREATE TABLE bdregiao.tmicroregiao_ttalhao (
    oid_microregiao INT2 NOT NULL,
    oid_talhao INT2 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao_ttalhao ADD CONSTRAINT tmicroregiao_ttalhao_fk1 FOREIGN
KEY(oid_microregiao) REFERENCES bdregiao.tmicroregiao(oid_microregiao) ON DELETE NO ACTION ON
UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdregiao.tmicroregiao_ttalhao ADD CONSTRAINT tmicroregiao_ttalhao_pk PRIMARY
KEY(oid_microregiao, oid_talhao);

```

Esquema bdusina

```
CREATE SCHEMA bdusina AUTHORIZATION postgres;

-----
CREATE TABLE bdusina.tsolo (
    oid_solo INT2 NOT NULL,
    tiposolo VARCHAR(57) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdusina.tsolo ADD CONSTRAINT tsolo_pk PRIMARY KEY(oid_solo);

-----
CREATE TABLE bdusina.tcultura (
    oid_cultura INT2 NOT NULL,
    nome VARCHAR(30) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdusina.tcultura ADD CONSTRAINT tcultura_pk PRIMARY KEY(oid_cultura);

-----
CREATE TABLE bdusina.tmaturacao (
    oid_maturacao INT2 NOT NULL,
    maturacao VARCHAR(23) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdusina.tmaturacao ADD CONSTRAINT tmaturacao_pk PRIMARY KEY(oid_maturacao);

-----
CREATE TABLE bdusina.tvariedade (
    oid_variedade INT2 NOT NULL,
    oid_cultura INT2 NOT NULL,
    oid_maturacao INT2 NOT NULL,
    variedade VARCHAR(23) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdusina.tvariedade ADD CONSTRAINT tvariedade_pk PRIMARY KEY(oid_variedade);
ALTER TABLE bdusina.tvariedade ADD CONSTRAINT tvariedade_fk1 FOREIGN KEY(oid_cultura)
REFERENCES bdusina.tcultura(oid_cultura) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdusina.tvariedade ADD CONSTRAINT tvariedade_fk2 FOREIGN KEY(oid_maturacao)
REFERENCES bdusina.tmaturacao(oid_maturacao) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;

-----
CREATE TABLE bdusina.tambiente (
    oid_ambiente INT2 NOT NULL,
    oid_solo INT2 NOT NULL,
    oid_variedade INT2 NOT NULL
);
ALTER TABLE bdusina.tambiente ADD CONSTRAINT tambiente_pk PRIMARY KEY(oid_ambiente);
ALTER TABLE bdusina.tambiente ADD CONSTRAINT tambiente_fk1 FOREIGN KEY(oid_solo) REFERENCES
bdusina.tsolo(oid_solo) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdusina.tambiente ADD CONSTRAINT tambiente_fk2 FOREIGN KEY(oid_variedade)
REFERENCES bdusina.tvariedade(oid_variedade) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
CREATE UNIQUE INDEX tambiente_idx1 ON bdusina.tambiente USING btree (oid_solo, oid_variedade);

-----
CREATE TABLE bdusina.tfazenda (
    oid_fazenda INT2 NOT NULL,
    nome VARCHAR(57) NOT NULL
);
ALTER TABLE bdusina.tfazenda ADD CONSTRAINT tfazenda_pk PRIMARY KEY(oid_fazenda);

-----
```

```

-----
CREATE TABLE bdusina.ttalhao (
  oid_talhao INT2 NOT NULL,
  oid_fazenda INT2 NOT NULL,
  oid_ambiente INT2 NOT NULL,
  id_sig VARCHAR(16) NOT NULL,
  codfrente INT2 NULL,
  codsecaozona INT2 NOT NULL,
  codtalhao INT2 NOT NULL,
  data_plantio DATE NOT NULL,
  espacamento_plantio FLOAT4,
  areaplantadahectare FLOAT4,
  shape_area FLOAT8
);
ALTER TABLE bdusina.ttalhao ADD CONSTRAINT ttalhao_fk1 FOREIGN KEY(oid_ambiente) REFERENCES
bdusina.tambiente(oid_ambiente) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdusina.ttalhao ADD CONSTRAINT ttalhao_fk2 FOREIGN KEY(oid_fazenda) REFERENCES
bdusina.tfazenda(oid_fazenda) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdusina.ttalhao ADD CONSTRAINT ttalhao_pk PRIMARY KEY(oid_talhao);
CREATE UNIQUE INDEX ttalhao_idx1 ON bdusina.ttalhao USING btree (id_sig);
CREATE UNIQUE INDEX ttalhao_idx2 ON bdusina.ttalhao USING btree
(codfrente,oid_fazenda,codsecaozona,codtalhao);

-----

CREATE TABLE bdusina.tcortehistorico (
  oid_talhao INT2 NOT NULL,
  data_corte DATE NOT NULL,
  num_corte INT2 NOT NULL,
  tch FLOAT4,
  producao_obtida FLOAT8
);
ALTER TABLE bdusina.tcortehistorico ADD CONSTRAINT tcortehistorico_fk1 FOREIGN KEY(oid_talhao)
REFERENCES bdusina.ttalhao(oid_talhao) ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION;
ALTER TABLE bdusina.tcortehistorico ADD CONSTRAINT tcortehistorico_pk PRIMARY
KEY(oid_talhao,data_corte);

-----

```