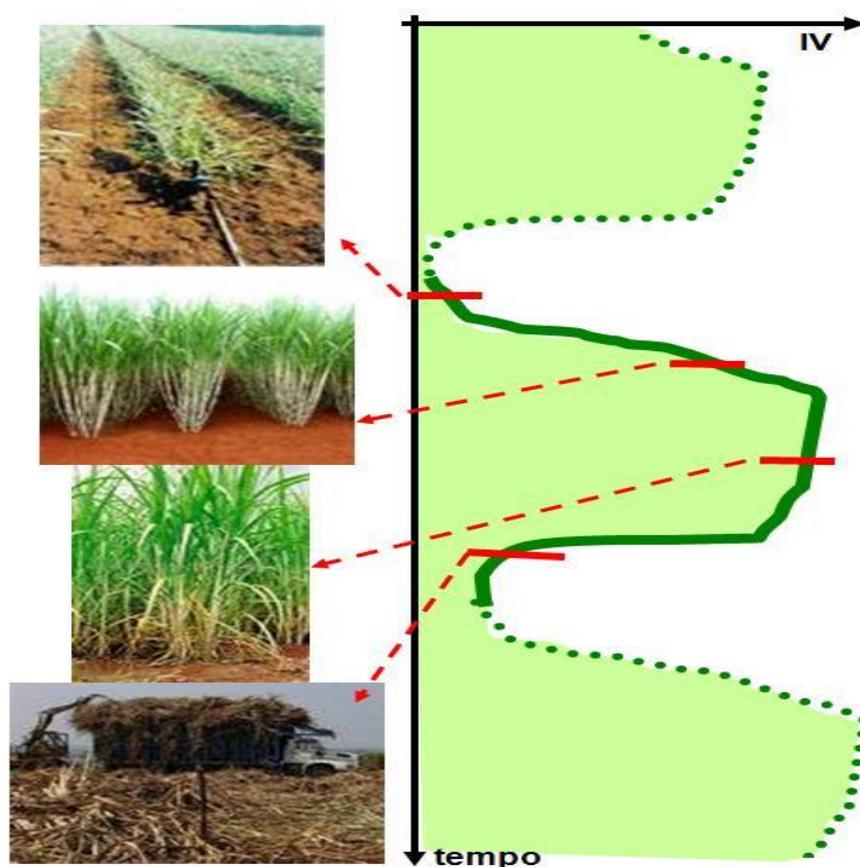


# Documentos 76

On-line

ISSN 0103-78110  
Dezembro, 2009

**Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir de índices espectrais de vegetação**





*INSS 0103-78110  
Dezembro, 2009*

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Monitoramento por Satélite  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# *Documentos On-line 76*

## **Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir de índices espectrais de vegetação**

Adriano Rolim da Paz  
Daniel de Castro Victoria  
Aryeverton Fortes de Oliveira  
Ricardo Guimarães Andrade

Embrapa Monitoramento por Satélite  
Campinas, SP  
2009

Exemplares dessa publicação podem ser solicitados na:

**Embrapa Monitoramento por Satélite**

Área de Comunicação e Negócios

Av. Soldado Passarinho, 303 – Fazenda Chapadão

CEP 13070 115 Campinas, SP – BRASIL

Telefone: +55 (19) 3211 6200 Fax: +55 (19) 3211 6222

<http://www.cnpm.embrapa.br>

[sac@cnpm.embrapa.br](mailto:sac@cnpm.embrapa.br)

**Comitê de Publicações**

Presidente: *José Roberto Miranda*

Secretário-Executivo: *Shirley Soares da Silva*

Membros: *Carlos Cesar Ronquim*

*Daniel de Castro Victoria*

*Davi de Oliveira Custódio*

*Graziella Galinari*

*Luciane Dourado*

*Meire Volotão Stephano*

1ª edição

1ª impressão (2009)

Fotos: Arquivo da Unidade

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Embrapa Monitoramento por Satélite

---

Paz, Adriano Rolim da

Monitoramento espaço-temporal da cana-de-açúcar a partir de índices espectrais de vegetação / Adriano Rolim da Paz, Daniel de Castro Victoria, Aryeverton Fortes de Oliveira, Ricardo Guimarães Andrade. – Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009.

31 p.: il. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 76).  
ISSN 0103-78110

1. MODIS. 2. Sensoriamento remoto. 3. Série temporal. 4. Monitoramento agrícola. I. Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite (Campinas, SP). II. Título. III. Série.

CDD 630.2

---

© Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009

## ***Autores***

### **Adriano Rolim da Paz**

Eng. Civil, Mestre em Recursos Hídricos  
Embrapa Monitoramento por Satélite  
*adriano@cnpm.embrapa.br*

### **Daniel de Castro Victoria**

Eng. Agrônomo, Mestre em Ecologia Aplicada  
Embrapa Monitoramento por Satélite  
*daniel@cnpm.embrapa.br*

### **Aryeverton Fortes de Oliveira**

Economista, Doutor em Ciências  
Embrapa Informática Agropecuária  
*ary@cnptia.embrapa.br*

### **Ricardo Guimarães Andrade**

Eng. Agrícola, Doutor em Meteorologia Agrícola  
Embrapa Monitoramento por Satélite  
*ricardo@cnpm.embrapa.br*

## **Sumário**

|  |    |
|--|----|
| <b>1 – Introdução</b> .....  | 9  |
| <b>2 – Metodologia</b> .....   | 11 |
| 2.1 Área de estudo .....   | 11 |
| 2.2 Séries temporais de índices de vegetação .....   | 11 |
| 2.3 Elaboração de máscara de áreas de cana-de-açúcar.....                                      | 12 |
| 2.4 Elaboração de máscara de áreas de cana-reforma .....                                       | 13 |
| 2.5 Suavização dos perfis temporais e extração de parâmetros .....                             | 14 |
| 2.6 Classificação com base nos perfis temporais suavizados e nos<br>parâmetros derivados ..... | 16 |
| <b>3 – Resultados e Discussão</b> .....  | 17 |
| 3.1 Padrões de perfis temporais de IV .....  | 17 |
| 3.2 Classificação de áreas de cana/não-cana .....  | 20 |
| 3.3 Classificação de áreas de cana-planta e cana-soca .....                                    | 25 |
| <b>4 - Conclusões</b> .....  | 27 |
| <b>5 – Agradecimentos</b> .....  | 28 |
| <b>6 - Referências</b> .....   | 29 |

## Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Área amostral selecionada para analisar perfis temporais dos índices de vegetação, com classificação dos talhões de cana-de-açúcar do projeto CANASAT (RUDORFF et al., 2005) para o ano-safra 2006 (as áreas brancas na imagem da direita são áreas sem cana-de-açúcar). ....  | 11 |
| <b>Figura 2:</b> Dados vetoriais do CANASAT para a área piloto (esquerda); quantidade de <i>pixels</i> CANASAT-25m internos a cada <i>pixel</i> MODIS-250m (centro); identificação dos <i>pixels</i> MODIS-250m que abrangem 100% de <i>pixels</i> CANASAT-25m rotulados como cana-de-açúcar (direita). ....  | 13 |
| <b>Figura 3:</b> Dados vetoriais do CANASAT para a área piloto (esquerda); quantidade de <i>pixels</i> CANASAT-25m internos a cada <i>pixel</i> MODIS-250m classificado como reforma em 2006 (centro); identificação dos <i>pixels</i> MODIS-250m que possuem $\geq 50\%$ de <i>pixels</i> CANASAT-25m rotulados como cana-reforma 2006 (direita). ....   | 14 |
| <b>Figura 4:</b> (a) (esquerda) Ajuste de função matemática pelo método da rotina TIMESAT (linha fina é a curva de dados observados; linha tracejada é o resultado do primeiro passo do ajuste; linha grossa é o ajuste final); (b) (direita) Parâmetros fenológicos identificados na curva de índice de vegetação (Tabela 1) (Fonte: Adaptado de Jonsson e Eklundh, 2004). ....                        | 15 |
| <b>Figura 5:</b> Perfil temporal de EVI (curva azul) com ajuste de função logística dupla (curva vermelha), em um <i>pixel</i> de não-cana que passou a ser cana-de-açúcar (escala de tempo em passos de 16 dias; eixo y é EVIx10000). ....   | 18 |
| <b>Figura 6:</b> Perfil temporal de NDVI (curva azul) ajustado pela função assimétrica gaussiana (curva preta), com indicação de um ciclo curto de 4 meses (seta) antes da reforma da cana-de-açúcar (escala de tempo em passos de 16 dias; eixo y em valores de NDVI x 10000). ....  | 18 |
| <b>Figura 7:</b> Parâmetro amplitude e integral menor dos ciclos para as amostras de <i>pixels</i> “puros” de cana-de-açúcar selecionadas (eixo x são os 14.000 <i>pixels</i> puros; eixo y é o valor do parâmetro relativo a NDVIx10000). ....   | 19 |
| <b>Figura 8:</b> Relação entre parâmetros integral maior do ciclo e duração do ciclo para pontos de cana-de-açúcar em ciclos consecutivos, sendo o ciclo 6 o de cana-planta posterior à reforma, o ciclo 5 anterior à reforma, e o ciclo 7 o de cana-soca posterior à cana-planta (parâmetros com valores relativos a NDVIx10000). ....   | 20 |
| <b>Figura 9:</b> Comparação do resultado da classificação cana/não-cana com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT; classificação realizada segundo critério da amplitude do ciclo da função assimétrica gaussiana ajustada ao perfil temporal de NDVI (cana-de-açúcar com valores de amplitude entre 0,35 e 0,55). ....  | 21 |
| <b>Figura 10:</b> Comparação do resultado da classificação cana/não-cana com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT; classificação realizada segundo critério da amplitude do ciclo da função assimétrica gaussiana ajustada ao perfil temporal de NDVI (cana-de-açúcar com valores de amplitude entre 0,40 e 0,55). ....   | 22 |
| <b>Figura 11:</b> Comparação do resultado da classificação cana/não-cana com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT; classificação realizada segundo critério da integral menor do ciclo da função assimétrica gaussiana ajustada ao perfil temporal de NDVI [cana-de-açúcar com valores de integral menor do ciclo entre (a) 4 e 10, (b) 5 e 10; (c) 6 e 10]. .... | 24 |
| <b>Figura 12:</b> Comparação da classificação entre áreas de cana-soca e cana-planta para o ciclo 2006 da área piloto, com base nos critérios dos parâmetros fenológicos derivados dos perfis temporais de índices de vegetação, e máscara de cana-reforma derivada dos dados do projeto CANASAT. ....  | 26 |

## ***Tabelas***

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1:</b> Relação dos parâmetros fenológicos identificados na curva de índice de vegetação através da rotina TIMESAT.....   | 16 |
| <b>Tabela 2:</b> Avaliação da classificação da área piloto em cana/não-cana segundo o critério da amplitude do ciclo, para diferentes faixas de valores, em comparação com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT.....             | 21 |
| <b>Tabela 3:</b> Avaliação da classificação da área piloto em cana/não-cana segundo o critério da amplitude do ciclo, para diferentes faixas de valores, em comparação com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT.....             | 23 |
| <b>Tabela 4:</b> Critérios de classificação para distinção entre áreas de cana-planta e cana-soca, baseados nos valores dos parâmetros dos ciclos fenológicos/agronômicos extraídos a partir do ajuste da função assimétrica gaussiana ao perfil temporal de NDVI..... | 25 |

## **Resumo**

Para culturas agrícolas que abrangem grandes áreas, como é o caso da cana-de-açúcar no Brasil, técnicas de geoprocessamento aplicadas a imagens orbitais de alta resolução temporal apresentam grande potencial de mapear e monitorar os ciclos fenológicos/agronômicos das lavouras. Para essa finalidade, destaca-se o uso de séries temporais de índices espectrais de vegetação (IV) como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) calculados a partir das imagens orbitais de reflectância. Este documento apresenta resultados de uma pesquisa que avaliou a utilização de um método de suavização de perfis temporais de IV e a posterior derivação de parâmetros do ciclo fenológico/agrícola de talhões de cana-de-açúcar, com o objetivo de monitorar e mapear áreas ocupadas por cana-de-açúcar e de distinguir áreas de cana-planta e cana-soca. Foram utilizadas séries temporais de NDVI e EVI do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite Terra referentes a uma região do Nordeste do Estado de São Paulo, densamente ocupada por cana-de-açúcar. Os resultados obtidos mostraram grande utilidade das séries temporais de IV do MODIS para monitorar o ciclo agrônomo/fenológico de talhões de cana-de-açúcar. Foi possível acompanhar o desenvolvimento da cana-de-açúcar e identificar a ocorrência de cana-planta ou cana-soca para um determinado talhão. O cultivo de uma cultura de ciclo mais curto, ao fazer a reforma do talhão de cana-de-açúcar, também foi identificado nos perfis temporais. A metodologia desenvolvida para classificação de áreas de cana-de-açúcar obteve erro de comissão relativamente pequeno ( $<10\%$ ), mas ao custo de erro de omissão mais elevado ( $>40\%$ ). A classificação realizada para distinção entre áreas de cana-planta e cana-soca também apresentou resultados interessantes, com erro de omissão em torno de 4% e erro de comissão  $>30\%$ .

# 1 – Introdução

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

A despeito da importância estratégica da produção de cana-de-açúcar no Brasil, ainda são limitadas as informações disponíveis para diagnosticar, acompanhar e prever o processo de expansão e intensificação dessa atividade no país, a despeito dos levantamentos censitários e cadastrais diversos e do importante mapeamento da área plantada realizado pelo projeto CANASAT (RUDORFF et al., 2005). Em termos de políticas públicas e tomada de decisão, as informações existentes atualmente ainda são insuficientes e é preciso aprofundar algumas questões com mais pesquisas.

Praticamente todas as estimativas de safra são realizadas a partir de levantamentos de campo, questionários e entrevistas. Trata-se de um processo trabalhoso, sujeito à subjetividade e limitado a uma pequena amostragem. A previsão de safra de cana-de-açúcar tem aplicação direta para estimar níveis de preços ao longo do ano-safra, já que a oferta tende a ser uma das principais condicionantes da variabilidade de preços da cana-de-açúcar (MELO et al., 2008; SATOLO, 2008). Além disso, melhorar a previsão de safra de cana-de-açúcar tem repercussões econômicas múltiplas, relacionadas à disponibilidade de matéria prima para a produção de açúcar e álcool e à comercialização desses produtos nos mercados interno e externo (AGUIAR et al., 2007).

Atualmente, é crescente a quantidade de estudos desenvolvidos a partir de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento, os quais podem resultar em melhorias na detecção, monitoramento e previsão de safra de culturas como a da cana-de-açúcar. Os estudos têm focado a identificação de áreas ocupadas por lavouras (GLERIANI et al., 2005; XAVIER et al., 2006), a relação entre índice de vegetação e precipitação (AGUIAR et al., 2007; LUCAS; SCHULER, 2007), a estimativa de evapotranspiração (ANDRADE, 2008), a discriminação de variedades (FORTES, 2003; GALVÃO et al., 2005), a estimativa de produtividade (ANDRADE, 2008; FORTES, 2003; MACHADO, 2003; PELLEGRINO, 2001; PICOLI et al., 2007; PONTES et al., 2005), a relação com índices agroclimáticos (GONÇALVES, 2008), a identificação de estágios fenológicos (LUCAS; SCHULER, 2007; PELLEGRINO, 2001) e a estimativa de características biofísicas, como índice de área foliar e biomassa (ANDRADE, 2008; PELLEGRINO, 2001; SIMÕES, 2004).

Para culturas agrícolas que abrangem grandes áreas, como é o caso da cana-de-açúcar no Brasil, as técnicas de geoprocessamento aplicadas a imagens orbitais de alta

resolução temporal apresentam grande potencial para mapear e monitorar o ciclo vegetativo das lavouras. Com base na variação ao longo do tempo de índices espectrais de vegetação, como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*), estudos têm identificado áreas com uso agrícola em expansão ou consolidadas, frequências de cultivo e até características fenológicas de lavouras (BRADLEY et al., 2007; GALFORD et al., 2008; JÖNSSON; EKLUNDH, 2002; KASTENS et al., 2005; LU; WENG, 2007; LUNETTA et al., 2006; WARDLOW et al., 2007).

O índice NDVI é o tradicionalmente mais utilizado e é determinado pelo quociente entre a diferença e a soma das reflectâncias das bandas do infra-vermelho próximo e vermelho do visível. Esse índice é utilizado como uma medida semi-quantitativa da densidade e do vigor da vegetação e apresenta correlações com características biofísicas da vegetação, como índice de área foliar e biomassa verde. O índice EVI foi desenvolvido mais recentemente com o intuito de minimizar limitações do índice NDVI quanto a problemas como saturação em áreas densamente vegetadas, influência de efeitos atmosféricos e do substrato e efeitos da geometria de aquisição.

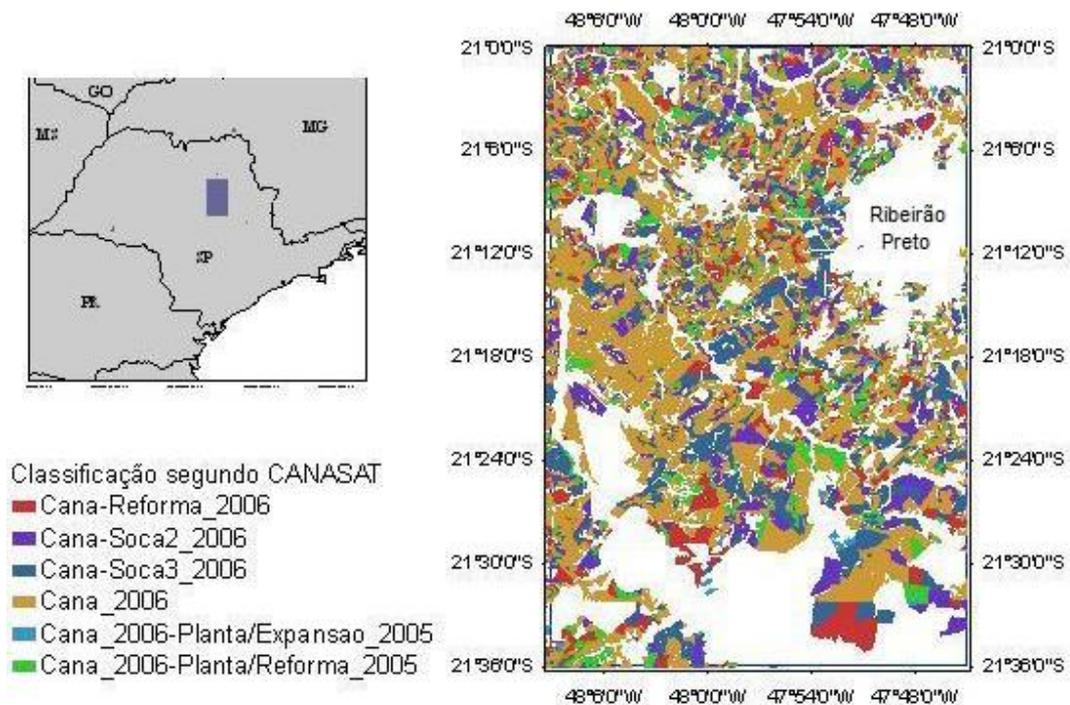
Atualmente, estudos com séries temporais de índices de vegetação têm sido conduzidos principalmente com imagens de dois sensores de alta resolução temporal: AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*). O sensor AVHRR produz imagens diárias de reflectância da superfície com resolução espacial de 1 km, desde o final da década de 1970 (BUITEN; CLEVERS, 1993). O sensor MODIS gera imagens de reflectância a nível diário com resolução espacial de 250 m desde 1999, a bordo da plataforma Terra, e desde o ano 2002, na plataforma Aqua. As imagens do MODIS coletadas nas plataformas Terra e Aqua são defasadas no tempo, sendo a primeira por volta das 10h30 e a outra às 13h30, no Equador. A qualidade geométrica das imagens, correções atmosféricas e alta resolução radiométrica caracterizam importantes avanços nos dados do MODIS em relação ao AVHRR (ZHANG et al., 2003; RUDORFF et al., 2007; REN et al., 2008).

Nesta pesquisa, o método proposto na rotina computacional TIMESAT (JÖNSSON; EKLUNDH, 2004; 2006) foi aplicado a séries temporais dos índices NDVI e EVI do sensor MODIS em áreas amostrais de uma região onde a cultura de cana-de-açúcar está consolidada (Nordeste do Estado de São Paulo). Os objetivos são: (i) identificar e caracterizar padrões de perfil temporal de NDVI e EVI do MODIS em áreas de cultura de cana-de-açúcar; (ii) apresentar e testar uma metodologia para identificação de áreas de cana-de-açúcar e para distinção entre áreas de cana-soca e cana-planta com base nos perfis temporais de NDVI e EVI.

## 2 – Metodologia

### 2.1 Área de estudo

A área amostral selecionada para testar a metodologia proposta nesta pesquisa compreende uma região intensamente cultivada com cana-de-açúcar, próximo ao núcleo urbano de Ribeirão Preto, no Nordeste do Estado de São Paulo (Figura 1).



**Figura 1:** Área amostral selecionada para analisar perfis temporais dos índices de vegetação, com classificação dos talhões de cana-de-açúcar do projeto CANASAT (RUDORFF et al., 2005) para o ano-safra 2006 ( as áreas brancas na imagem da direita são áreas sem cana-de-açúcar).

### 2.2 Séries temporais de índices de vegetação

As séries temporais de NDVI e EVI, composição de 16 dias (produto MOD13Q1 da série 5), foram obtidas do *Land Processes Distributed Active Archive Center* da Agência Espacial Norte-Americana (Nasa) através do *Warehouse Inventory Search Tool* (WIST), no endereço eletrônico [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get\\_data/wist](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/wist). Foram obtidas também imagens que indicam a credibilidade dos dados de NDVI e EVI (*pixel reliability*).

Foram tomadas imagens do *tile* H13V11, que abrange a área de estudo, para o período 2000 a 2008. As imagens disponibilizadas são em formato HDF-EOS (*Hierarchical Data Format – Earth Observing System*) e projeção Sinusoidal, de difícil manipulação na maioria dos *softwares* de geoprocessamento. Através do *software* MRT (*Modis Reprojection Tool*) desenvolvido pela própria Nasa, as imagens foram recortadas e

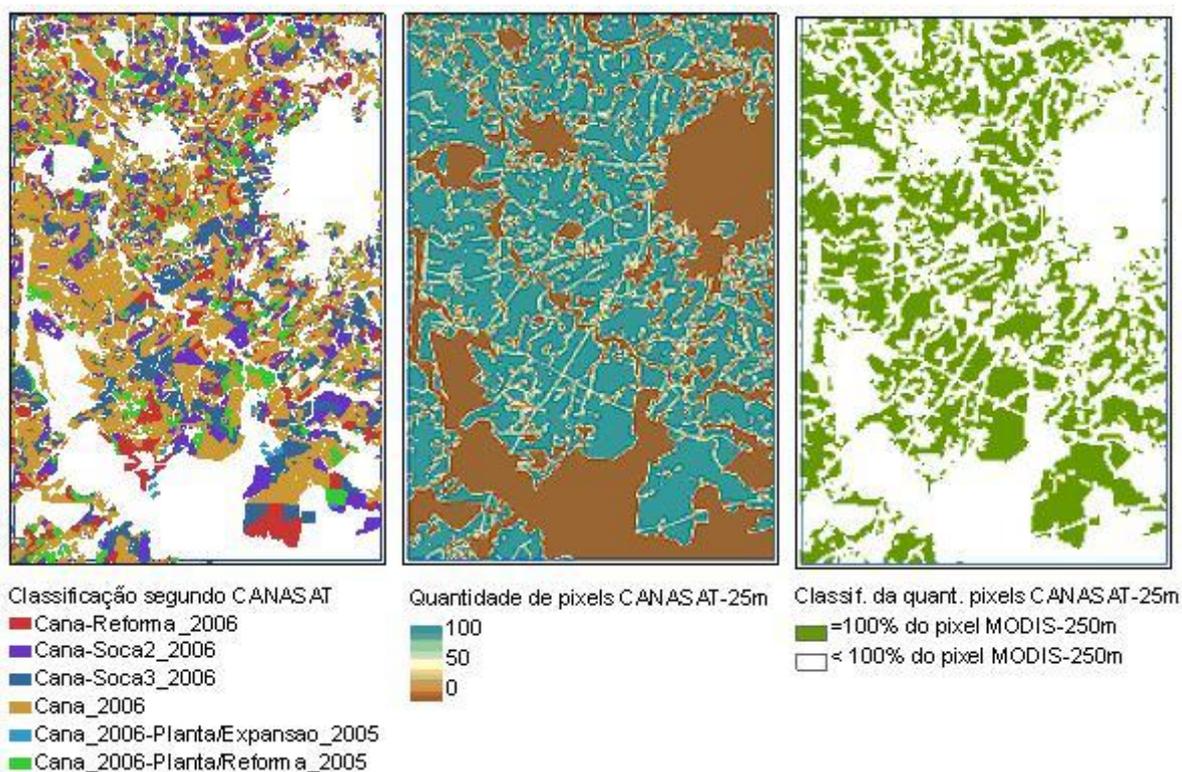
convertidas para o formato geotiff e projeção geográfica latitude-longitude com sistema de referência WGS84.

### **2.3 Elaboração de máscara de áreas de cana-de-açúcar**

Foi realizado um procedimento para identificar os *pixels* da imagem MODIS nos quais a cobertura é classificada como cana-de-açúcar segundo os dados do projeto CANASAT (RUDORFF et al., 2005). O objetivo foi separar os *pixels* considerados “puros” de cana-de-açúcar na resolução das imagens MODIS de 250 m, com base nas informações mais detalhadas provenientes do CANASAT.

Os arquivos vetoriais com a classificação dos polígonos de cana-de-açúcar do CANASAT, para os anos-safra de 2006, 2007 e 2008, foram convertidos para o formato *raster* com resolução espacial de 25 m. Tal resolução foi escolhida por ser a mais próxima da resolução de origem dos dados do CANASAT (imagens Landsat com resolução de 30 m) e por ser sub-múltipla da resolução das imagens MODIS. Dessa forma, cada *pixel* MODIS-250m abrange 100 *pixels* das imagens CANASAT-25m.

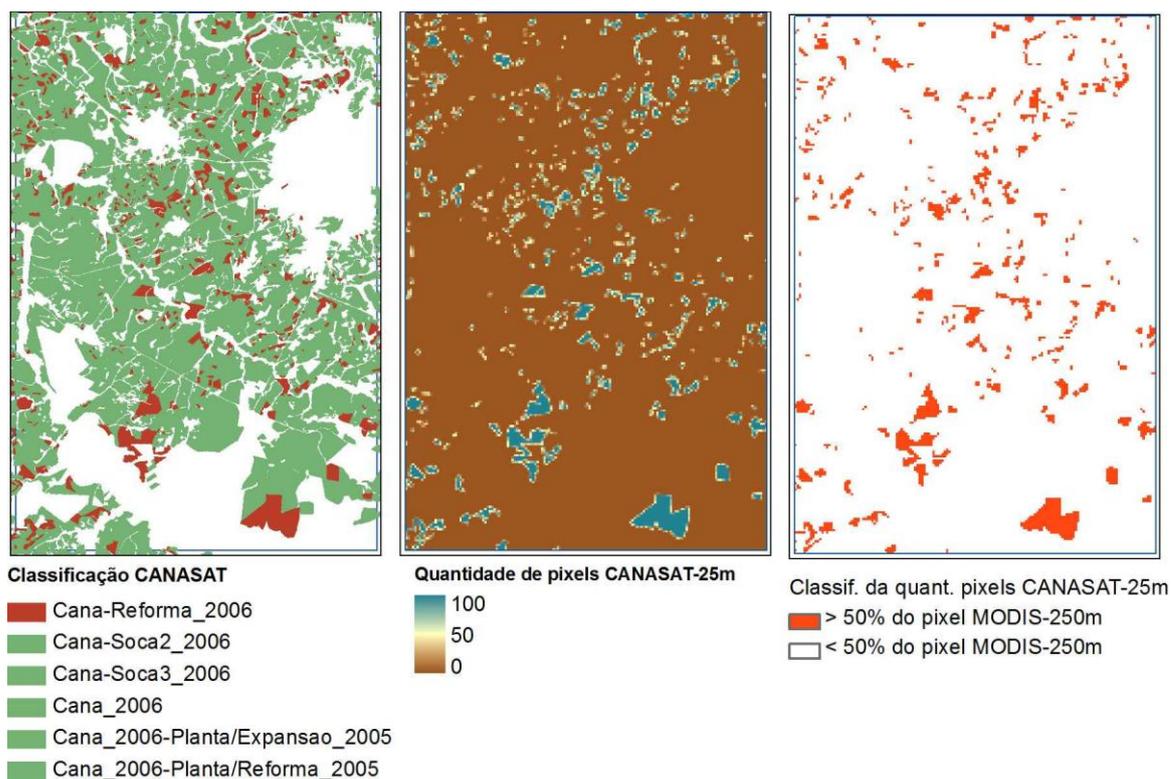
Uma rotina computacional foi desenvolvida para contabilizar quantos *pixels* CANASAT-25m representativos de alguma classe de cana-de-açúcar estão presentes em cada *pixel* MODIS-250m (Figura 2). A partir desse plano de informações, foi gerada uma imagem distinguindo os *pixels* MODIS-250m que continham 100% dos *pixels* CANASAT-25m rotulados como cana-de-açúcar dos demais *pixels* com percentual inferior. Tal imagem contém aproximadamente 14.000 *pixels* “puros” e representa a máscara de áreas de cana-de-açúcar utilizada nesta pesquisa.



**Figura 2:** Dados vetoriais do CANASAT para a área piloto (esquerda); quantidade de *pixels* CANASAT-25m internos a cada *pixel* MODIS-250m (centro); identificação dos *pixels* MODIS-250m que abrangem 100% de *pixels* CANASAT-25m rotulados como cana-de-açúcar (direita).

## 2.4 Elaboração de máscara de áreas de cana-reforma

Seguindo procedimento análogo ao empregado para gerar a máscara de cana/não-cana, foi gerada uma máscara definida pelos talhões de cana-de-açúcar que foram reformados na safra de 2006, segundo dados do CANASAT. A máscara distingue os *pixels* da grade de 250 m das imagens MODIS que possuem no mínimo 50% de *pixels* de 25 m classificados como cana-reforma em 2006, segundo o CANASAT (Figura 3).



**Figura 3:** Dados vetoriais do CANASAT para a área piloto (esquerda); quantidade de *pixels* CANASAT-25m internos a cada *pixel* MODIS-250m classificado como reforma em 2006 (centro); identificação dos *pixels* MODIS-250m que possuem  $\geq 50\%$  de *pixels* CANASAT-25m rotulados como cana-reforma 2006 (direita).

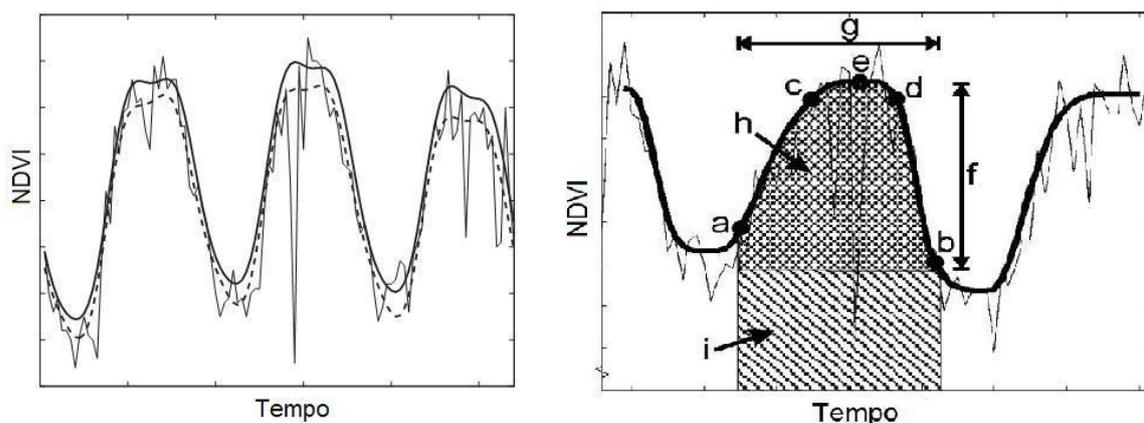
## 2.5 Suavização dos perfis temporais e extração de parâmetros

A rotina TIMESAT, desenvolvida por Jönsson e Eklundh (2004), foi utilizada para fazer o ajuste de funções matemáticas aos perfis temporais de NDVI/EVI. O método da referida rotina consiste em ajustar funções localmente a cada conjunto de pontos da série temporal do índice de vegetação, proporcionando melhor representação dos máximos e mínimos. Foi testado o ajuste tanto das funções assimétrica gaussiana e logística dupla quanto de filtros Savitzky-Golay (JÖNSSON; EKLUNDH, 2002), constituídos pelo ajuste ponderado de funções polinomiais.

O ajuste das funções matemáticas à série temporal foi feito para cada *pixel* da imagem individualmente, pelo método dos mínimos quadrados. Uma abordagem de ajuste por etapas foi realizada através do TIMESAT com o objetivo de aproximar a função ajustada à envoltória superior da curva de dados, devido à tendência de subestimativa presente nos índices de vegetação causada por efeito de nuvens. Na primeira etapa, o ajuste é realizado considerando os pesos atribuídos em função da qualidade dos dados. Os dados que ficaram acima da curva ajustada são considerados como mais importantes, por serem supostamente isentos de subestimativa de NDVI/EVI. Na segunda etapa, tais dados têm os pesos aumentados por um fator e o ajuste é refeito. Como resultado, a

função é ajustada pela envoltória superior dos dados e, ao final do processo, uma função global é construída pela combinação das várias funções locais (Figura 4-a).

A partir da função ajustada à curva de índice de vegetação, determinou-se uma série de parâmetros que caracterizam os ciclos fenológicos/agronômicos da cultura, incluindo (Tabela 1 e Figura 4-b): início, duração e término dos ciclos, taxas de aumento e diminuição do índice de vegetação durante crescimento e senescência, tempo e intensidade dos picos etc.



**Figura 4:** (a) (esquerda) Ajuste de função matemática pelo método da rotina TIMESAT (linha fina é a curva de dados observados; linha tracejada é o resultado do primeiro passo do ajuste; linha grossa é o ajuste final); (b) (direita) Parâmetros fenológicos identificados na curva de índice de vegetação (Tabela 1).

**Fonte:** Adaptado de Jönsson e Eklundh ( 2004).

**Tabela 1:** Relação dos parâmetros fenológicos identificados na curva de índice de vegetação através da rotina TIMESAT.

| Referência na Figura 4 | Nome do parâmetro                         | Descrição do parâmetro  |
|------------------------|---|---|
| a                      | Início do ciclo                           | Representa o início do ciclo da cultura   |
| b                      | Final do ciclo                            | Representa o final do ciclo da cultura  |
| c                      | Ponto de 90% do pico na curva ascendente  | Representa o ponto do ciclo a 90% do pico, na curva ascendente  |
| d                      | Ponto de 90% do pico na curva descendente | Representa o ponto do ciclo a 90% do pico, na curva descendente   |
| e                      | Pico do ciclo                             | Representa o valor máximo do ciclo  |
| f                      | Amplitude do ciclo                        | Representa a diferença entre o valor máximo e o nível de base do ciclo (média dos valores no início e final do ciclo) |

|   |                                  |   |
|---|----------------------------------|---|
| g | Duração do ciclo                 | Representa o tempo de duração do ciclo                      |
| h | Integral menor                   | Representa a área entre a função ajustada e o nível de base |
| i | Integral maior                   | Representa a área entre a função ajustada e o eixo x        |
| - | Tempo do pico                    | Representa o tempo em que ocorre o máximo do ciclo          |
| - | Declividade da curva ascendente  | Representa a declividade da parte ascendente do ciclo       |
| - | Declividade da curva descendente | Representa a declividade da parte descendente do ciclo      |

## **2.6 Classificação com base nos perfis temporais suavizados e nos parâmetros derivados**

Foram realizados dois tipos de classificação baseados nas características dos perfis temporais de índice de vegetação. O primeiro tipo de classificação foi realizado para distinguir áreas ocupadas por cana-de-açúcar das demais áreas e o segundo tipo objetivou diferenciar áreas de cana-planta e cana-soca dentre as áreas de cana-de-açúcar.

Os dois tipos de classificação foram efetuados *pixel a pixel*, isto é, cada *pixel* foi analisado de forma isolada e independente do resultado dos *pixels* vizinhos. Foram aplicados critérios baseados em faixas de valores de parâmetros fenológicos/agronômicos para realizar as classificações, os quais funcionaram como filtros. Por exemplo, se  $d1 < \text{duração} < d2$  e  $a1 < \text{amplitude} < a2$  então o *pixel* é identificado como cana-de-açúcar, onde  $d1$  e  $d2$  definem o intervalo de valores para o parâmetro duração do ciclo e  $a1$  e  $a2$  definem a faixa de valores para o parâmetro amplitude do ciclo.

Para definir quais parâmetros e quais faixas de valores a serem utilizados nas classificações, foram analisados os parâmetros extraídos para todos os *pixels* da máscara de cana/não-cana e da máscara de cana-reforma. O objetivo foi identificar padrões de ocorrência de valores considerados típicos de cada classe. O refinamento dos critérios de classificação foi posteriormente realizado a partir de tentativa e erro, conforme os resultados obtidos das classificações.

## 3 – Resultados e Discussão

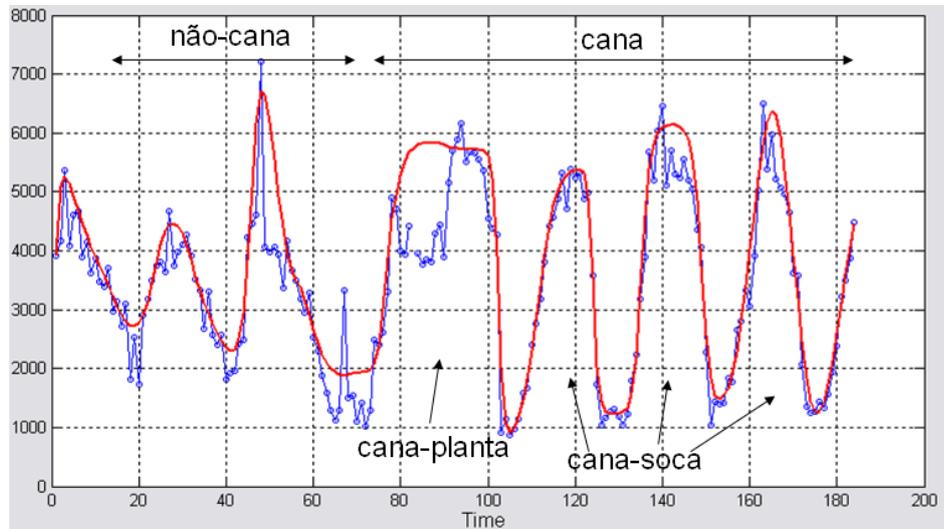
### 3.1 Padrões de perfis temporais de IV

Na Figura 5, é exemplificado o ajuste obtido para a função logística dupla ao perfil temporal de EVI de um *pixel* da área de estudo. O perfil extraído das imagens MODIS é representado pela curva azul, com um total de 184 pontos referentes às imagens compostas de 16 dias no período entre Janeiro de 2001 e Dezembro de 2008. Nesse perfil, observou-se uma oscilação de alta frequência dos valores de EVI devido à presença de ruídos e nuvens nas imagens e mesmo devido à mistura espectral da resposta dentro do *pixel* MODIS de 250 x 250 m. A curva ajustada pela função matemática foi suavizada, não apresentou as oscilações menores que foram filtradas e praticamente se limitou à variação sazonal dos ciclos fenológicos/agronômicos.

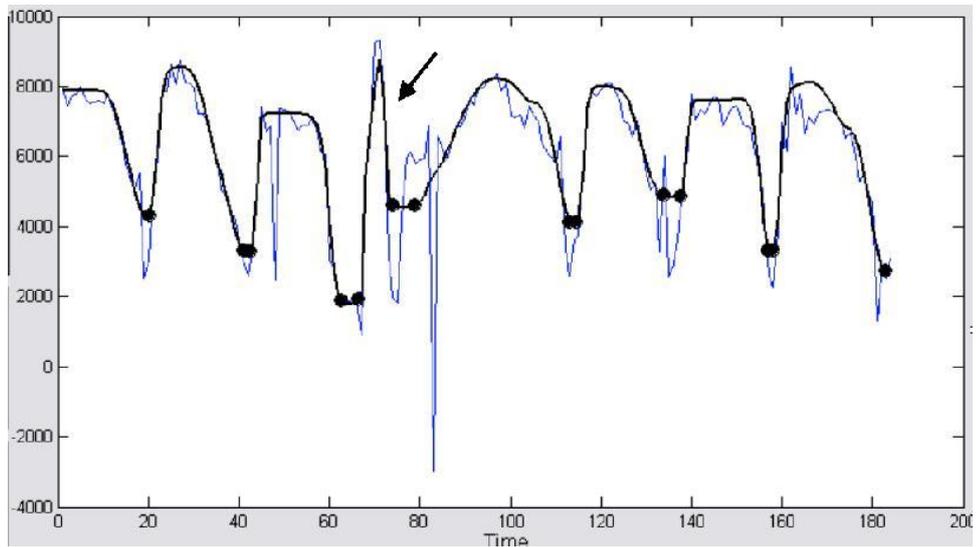
O *pixel* cujo perfil temporal de EVI é exemplificado na Figura 5 está em uma área que passou a ser ocupada por cana-de-açúcar em 2004. O sinal do perfil temporal antes e depois da conversão para cana-de-açúcar foi bem distinto. Nota-se também a diferença em termos de duração do ciclo entre a cana-planta e a cana-soca.

Em algumas situações de manejo, a reforma do talhão de cana-de-açúcar é precedida pelo cultivo de uma cultura de ciclo relativamente curto, em torno de três a quatro meses, como amendoim ou crotalária. Na Figura 6, é apresentado um perfil temporal de NDVI de um *pixel* situado em um talhão de cana-de-açúcar onde foi cultivada uma cultura de ciclo curto antes da reforma do canavial. Nesse caso, o ajuste da função assimétrica gaussiana corretamente isolou o ciclo mais curto entre os ciclos da cana-de-açúcar antes e depois da reforma. O ciclo seguinte à reforma foi tipicamente um ciclo de cana-planta, seguido por três ciclos de cana-soca.

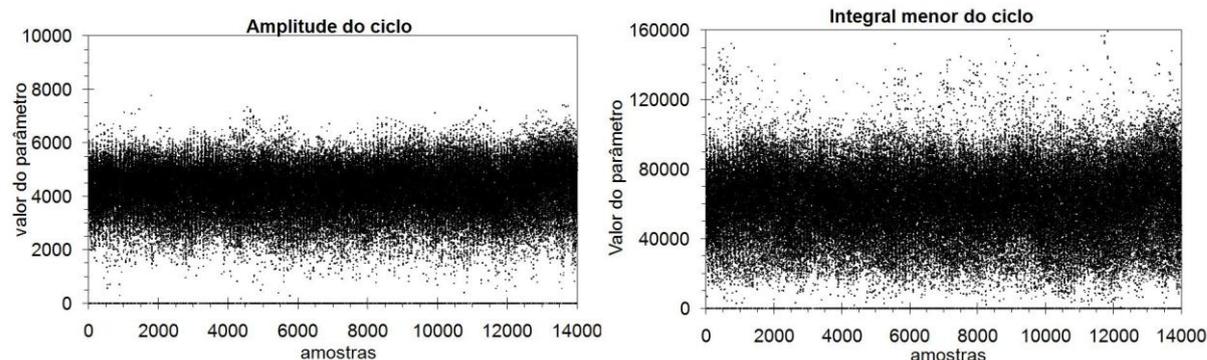
Nos dois exemplos mostrados (Figuras 5 e 6), foram observadas características semelhantes entre os perfis temporais dos ciclos de cana-de-açúcar, em termos de amplitude de valores, valores máximos e mínimos, duração etc. Com base no padrão de valores desses parâmetros do ciclo fenológico/agronômico obtidos para todos os 14.000 *pixels* da máscara de cana-de-açúcar, os parâmetros amplitude e integral menor do ciclo foram selecionados para servir como critério de identificação de áreas ocupadas por essa lavoura. As nuvens de pontos correspondentes aos valores obtidos para esses dois parâmetros são apresentadas na Figura 7, nas quais foram observadas faixas de valores predominantes. Essas faixas foram consideradas como intervalos de valores típicos para *pixels* localizados em áreas de cana-de-açúcar.



**Figura 5:** Perfil temporal de EVI (curva azul) com ajuste de função logística dupla (curva vermelha), em um *pixel* de não-cana que passou a ser cana-de-açúcar (escala de tempo em passos de 16 dias; eixo y é EVI x 10000).



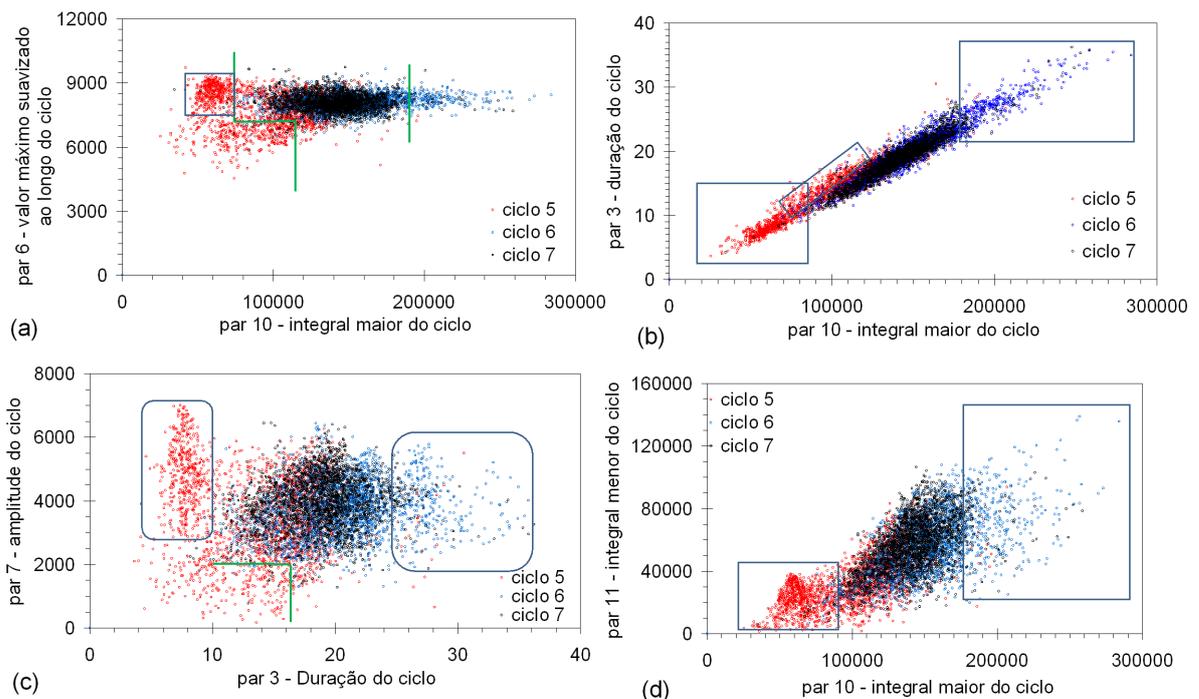
**Figura 6:** Perfil temporal de NDVI (curva azul) ajustado pela função assimétrica gaussiana (curva preta), com indicação de um ciclo curto de quatro meses (seta) antes da reforma da cana-de-açúcar (escala de tempo em passos de 16 dias; eixo y em valores de NDVI x 10000).



**Figura 7:** Parâmetro amplitude e integral menor dos ciclos para as amostras de *pixels* “puro” de cana-de-açúcar selecionadas (eixo x são os 14.000 *pixels* puros; eixo y é o valor do parâmetro relativo a NDVIx10000).

Para todos os *pixels* localizados na máscara cana-reforma da safra 2006, foram analisados os valores extraídos dos parâmetros fenológicos/agronômicos referentes ao ciclo correspondente à reforma (denominado ciclo 6) e também referentes aos ciclos anterior e posterior à reforma (denominados ciclo 5 e 7, respectivamente). O ciclo 6 correspondeu a um ciclo de cana-planta caracterizado por uma duração em torno de 1,5 ano. O ciclo anterior (ciclo 5) englobou diferentes situações, dependendo do histórico em cada área: ciclo curto de uma cultura como amendoim ou crotalária; ciclo de cana-planta ou de outra cultura/cobertura vegetal qualquer.

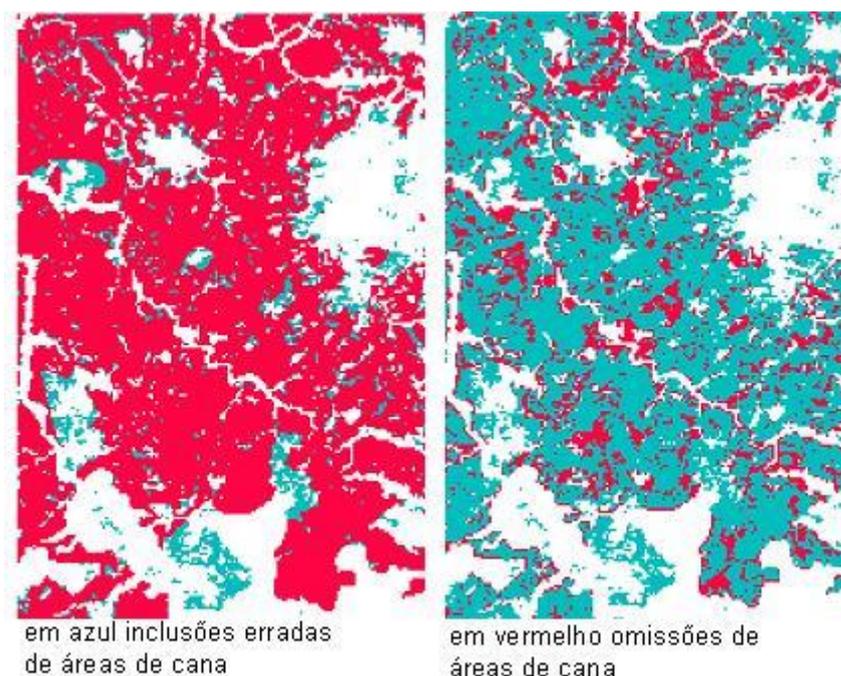
Posteriormente à cana-planta no ciclo 6, seguiu-se um ciclo de cana-soca, que durou em torno de um ano (denominado aqui de ciclo 7). Os gráficos da Figura 8 mostram como os ciclos 5, 6 e 7 se comportaram em termos dos parâmetros fenológicos/agronômicos extraídos a partir do ajuste das funções matemáticas usando a rotina TIMESAT. Em cada gráfico, há áreas de mistura entre os pontos referentes aos três ciclos, mas também ocorrem áreas onde predominam quase exclusivamente pontos de um determinado ciclo. Algumas dessas regiões foram delimitadas por retângulos ou identificadas por linhas nos referidos gráficos e foram traduzidas em faixas de valores dos parâmetros correspondentes para serem utilizadas como critérios de classificação de áreas de cana-reforma.



**Figura 8:** Relação entre parâmetros integral maior do ciclo e duração do ciclo para pontos de cana-de-açúcar em ciclos consecutivos, sendo o ciclo 6 o de cana-planta posterior à reforma, o ciclo 5 anterior à reforma, e o ciclo 7 o de cana-soca posterior à cana-planta (parâmetros com valores relativos a NDVIx10000).

### 3.2 Classificação de áreas de cana/não-cana

Considerando o critério amplitude do ciclo na faixa entre 0,35 e 0,55 para caracterizar áreas de cana-de-açúcar, o resultado obtido para a classificação da área piloto foi comparado à máscara de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT, como apresentado na Figura 9. Na imagem da esquerda da referida figura, os *pixels* em azul representam áreas erradamente consideradas como cana-de-açúcar (erro de comissão), que somaram 14% da quantidade total. Na imagem da direita, os *pixels* em vermelho representam erros de omissão, ou seja, áreas de cana-de-açúcar que não foram classificadas como tal. O erro de omissão foi superior ao de comissão, alcançando 36%. A exatidão total é 76% e a estatística Kappa é igual a 0,50 (Tabela 2).



**Figura 9:** Comparação do resultado da classificação cana/não-cana com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT; classificação realizada segundo critério da amplitude do ciclo da função assimétrica gaussiana ajustada ao perfil temporal de NDVI (cana-de-açúcar com valores de amplitude entre 0,35 e 0,55).

**Tabela 2:** Avaliação da classificação da área piloto em cana/não-cana segundo o critério da amplitude do ciclo, para diferentes faixas de valores, em comparação com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT.

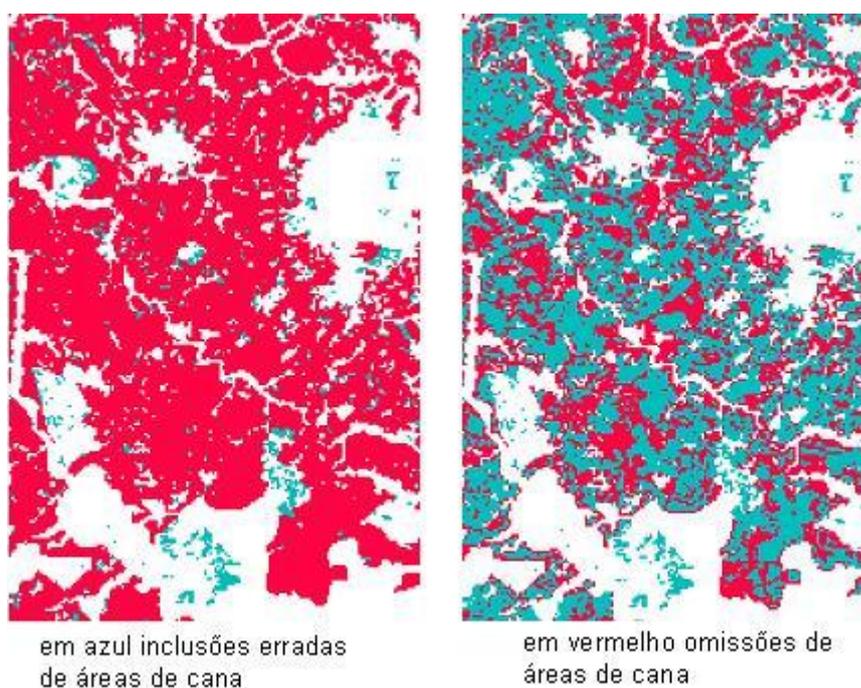
| Faixa de valores | Erro de comissão | Erro de omissão | Exatidão total | Kappa |
|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|
| 0,35 a 0,55      | 14%              | 36%             | 76%            | 0,50  |
| 0,38 a 0,55      | 11%              | 41%             | 72%            | 0,45  |
| 0,40 a 0,55      | 9,8%             | 45%             | 68%            | 0,39  |

Tomando como critério para identificar áreas de cana-de-açúcar o valor da amplitude do ciclo na faixa entre 0,40 e 0,55, os resultados obtidos indicaram uma redução no erro de comissão para apenas 9,8%, mas um acréscimo no erro de omissão, que atingiu o valor de 45%. Em consequência, o valor do coeficiente Kappa foi reduzido para 0,39 e a exatidão total reduzida para 68%. Essa segunda faixa de valores para o filtro de amplitude do ciclo representou um critério mais restritivo, no sentido de que as áreas classificadas como cana-de-açúcar em sua grande maioria realmente eram cana-de-açúcar (>90%) na máscara derivada dos dados do projeto CANASAT.

A comparação visual entre as imagens da esquerda das Figuras 9 e 10 ilustra como a inclusão errada de áreas de cana-de-açúcar no resultado da classificação foi reduzido ao passar do primeiro (amplitude entre 0,35 e 0,55) para o segundo critério (amplitude

entre 0,40 e 0,55). Por outro lado, esse segundo critério resultou numa classificação em que praticamente metade das áreas não indicadas como cana-de-açúcar foram erradamente classificadas como tal (Figura 10).

A adoção de uma faixa de valores de amplitude de 0,38 a 0,55 para a classificação das áreas de cana-de-açúcar resultou em performance intermediária àquelas obtidas para as duas outras faixas de valores já comentadas em termos de todas as estatísticas calculadas (Tabela 2).



**Figura 10:** Comparação do resultado da classificação cana/não-cana com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT; classificação realizada segundo critério da amplitude do ciclo da função assimétrica gaussiana ajustada ao perfil temporal de NDVI (cana-de-açúcar com valores de amplitude entre 0,40 e 0,55).

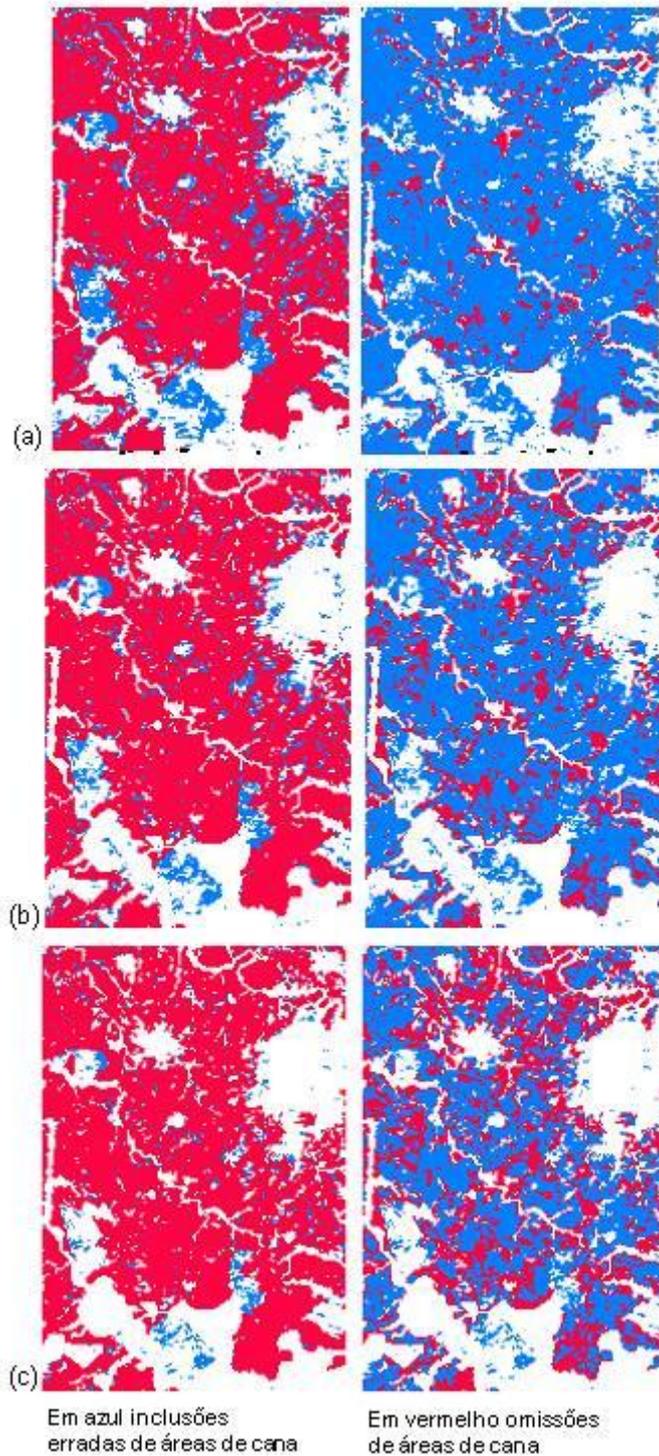
Considerando como critério o parâmetro amplitude menor do ciclo (Figura 11 e Tabela 3), são apresentados resultados obtidos ao utilizar três faixas distintas de valores para caracterizar áreas de cana-de-açúcar: (a) 4 a 10; (b) 5 a 10; (c) 6 a 10. Em comparação com a máscara de áreas de cana-de-açúcar do projeto CANASAT, o desempenho da distinção entre áreas de cana-de-açúcar e não-cana obtido na classificação com o critério da integral menor do ciclo foi semelhante ao alcançado com o critério da amplitude do ciclo.

Os menores erros de comissão e de omissão obtidos nas classificações com o critério da integral menor do ciclo foram, respectivamente, 11% e 28%, enquanto a maior exatidão total obtida foi de 77% e um Kappa de 0,49. Assim como no caso do critério da amplitude, a classificação com uma faixa de valores de integral menor do ciclo mais restrita (6 a 10) produziu o menor erro de comissão. Ao tornar a faixa de valores mais

ampla (integral menor do ciclo entre 4 e 10), aumentou-se o erro de comissão, reduziu-se o erro de omissão e foram obtidos os maiores valores de exatidão total e coeficiente Kappa

**Tabela 3:** Avaliação da classificação da área piloto em cana/não-cana segundo o critério da amplitude do ciclo, para diferentes faixas de valores, em comparação com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT.

| Faixa de valores | Erro de comissão | Erro de omissão | Exatidão total | Kappa |
|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|
| 4 a 10           | 21%              | 28%             | 77%            | 0,49  |
| 5 a 10           | 16%              | 37%             | 74%            | 0,48  |
| 6 a 10           | 11%              | 46%             | 67%            | 0,38  |



**Figura 11:** Comparação do resultado da classificação cana/não-cana com a máscara de áreas de cana-de-açúcar derivada dos dados do projeto CANASAT; classificação realizada segundo critério da integral menor do ciclo da função assimétrica gaussiana ajustada ao perfil temporal de NDVI [cana-de-açúcar com valores de integral menor do ciclo entre (a) 4 e 10, (b) 5 e 10; (c) 6 e 10].

### 3.3 Classificação de áreas de cana-planta e cana-soca

Como critérios para as classificações realizadas para distinguir entre áreas de cana-planta e cana-soca, foram utilizadas as faixas de valores dos parâmetros que definem as regiões delimitadas na Figura 8, discriminadas na Tabela 4. Alguns desses critérios foram estabelecidos com referência ao ciclo 6, para o qual foi feita a classificação, enquanto outros critérios fizeram referência ao ciclo anterior (pré-reforma, ciclo 5). Para cada *pixel*, o atendimento a qualquer dos critérios foi tomado como condição indicativa de cana-reforma no ciclo 6.

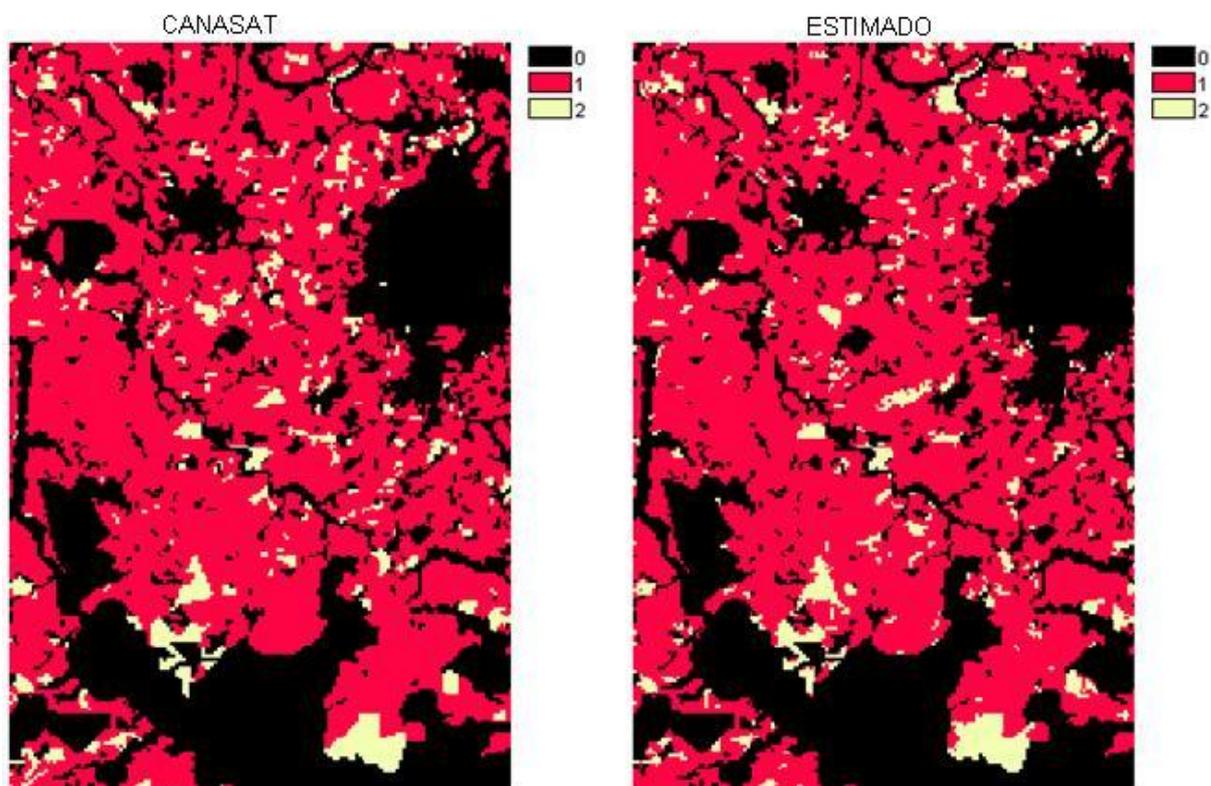
**Tabela 4:** Critérios de classificação para distinção entre áreas de cana-planta e cana-soca, baseados nos valores dos parâmetros dos ciclos fenológicos/agronômicos extraídos a partir do ajuste da função assimétrica gaussiana ao perfil temporal de NDVI.

| Critério | Descrição   | Ciclo ao qual se aplica |
|----------|---|-------------------------|
| 1        | $P10 < 74500$   | 5 (pré-reforma)         |
| 2        | $(P6 < 7100) \text{ E } (P10 < 112000)$   | 5 (pré-reforma)         |
| 3        | $P10 > 190000$  | 6 (cana-reforma)        |
| 4        | $(2700 < P7 < 7000) \text{ E } (4,1 < P3 < 9,9)$  | 5 (pré-reforma)         |
| 5        | $(P7 < 1980) \text{ E } (P3 < 16,2)$  | 5 (pré-reforma)         |
| 6        | $(24,4 < P3 < 35,2) \text{ E } (1840 < P7 < 6010)$  | 6 (cana-reforma)        |
| 7        | $(25400 < P10 < 95800) \text{ E } (3400 < P11 < 48300)$   | 5 (pré-reforma)         |
| 8        | $(173000 < P10 < 290000) \text{ E } (21000 < P11 < 150000)$                                     | 6 (cana-reforma)        |
| 9        | $(17000 < P10 < 82900) \text{ E } (2,3 < P3 < 15,2)$  | 5 (pré-reforma)         |
| 10       | $(180100 < P10 < 284000) \text{ E } (28,1 < P3 < 36,3)$   | 6 (cana-reforma)        |
| 11       | $(8,6 < P3 < 18,5) \text{ E } (78030 < P10 < 122890) \text{ E } (P3 > 0,0001926 * P10 - 5,149)$ | 5 (pré-reforma)         |

Parâmetros: P3 = duração; P6 = valor máximo (pico); P7 = amplitude; P10 = integral maior; P11 = integral menor.

A comparação visual entre a imagem estimada pela análise dos perfis temporais de índices de vegetação e a imagem derivada dos dados CANASAT aparentou excelente concordância, principalmente para as grandes lavouras de cana-de-açúcar rotuladas como cana-planta segundo o CANASAT (Figura 12). Em termos de estatísticas gerais, a exatidão total foi de 58% e o valor do coeficiente Kappa foi de 0,58.

O resultado obtido teve elevado erro de comissão (39%), mas teve erro bastante reduzido de omissão (4%). Isso significa um desempenho bastante satisfatório da classificação obtida quanto à detecção de áreas de reforma de cana-de-açúcar. Por outro lado, a indicação de áreas ocupadas por cana-planta na classificação realizada teve um erro associado considerado elevado.



0: não-cana (máscara)  
 1: cana-soca  
 2: cana-planta

**Figura 12:** Comparação da classificação entre áreas de cana-soca e cana-planta para o ciclo 2006 da área piloto, com base nos critérios dos parâmetros fenológicos derivados dos perfis temporais de índices de vegetação, e máscara de cana-reforma derivada dos dados do projeto CANASAT.

## 4 - Conclusões

Esta pesquisa avaliou a utilização de séries temporais de índices de vegetação (IV) derivados de imagens orbitais do sensor MODIS para monitoramento e mapeamento da cultura de cana-de-açúcar. Dado o perfil temporal de IV de um determinado *pixel*, foram ajustadas funções matemáticas para suavizar o ciclo da cultura representado no sinal de IV e extraídos parâmetros dos ciclos fenológicos/agronômicos. Com base nessas informações, foram propostas metodologias de identificação de áreas ocupadas por cana-de-açúcar e de distinção entre áreas ocupadas por cana-planta ou cana-soca.

Os resultados obtidos mostraram grande utilidade das séries temporais de IV do MODIS para monitorar o ciclo agrônomo/fenológico de talhões de cana-de-açúcar. Foi possível acompanhar o desenvolvimento da cana-de-açúcar e identificar a ocorrência de cana-planta ou cana-soca para um determinado talhão. O cultivo de uma cultura de ciclo mais curto ao fazer a reforma do talhão de cana-de-açúcar também foi identificado nos perfis temporais.

Foi testada a classificação entre áreas de cana/não-cana com base nos valores dos parâmetros amplitude do ciclo e integral menor do ciclo. A adoção de faixas de valores para caracterizar áreas de cana-de-açúcar consideradas restritivas se mostrou interessante no sentido de identificar áreas ocupadas por cana-de-açúcar. Com esse tipo de critério na classificação, o erro de comissão foi relativamente pequeno ( $< 10\%$ ), mas ao custo de grandes erros de omissão ( $> 40\%$ ). A adoção de faixas de valores dos parâmetros menos restritivas acarretou um maior equilíbrio entre erros de comissão e omissão, mas com valores mais elevados (ambos  $> 20\%$ ).

A classificação visando distinguir entre áreas de cana-planta e cana-soca com base nos parâmetros extraídos dos perfis temporais de IV também apresentou resultados interessantes. Alguns dos critérios testados apresentaram erros de omissão em torno de 4%. Embora os erros de comissão tenham sido elevados ( $> 30\%$ ), o pequeno erro de omissão potencializa o uso do método no sentido de direcionar a investigação da ocorrência de áreas de reforma de canavial. Na aplicação desse método a uma determinada região, caso o resultado não indique a ocorrência de áreas de cana-planta, pode-se assumir probabilidade muito pequena que exista, já que o erro de omissão na área piloto testada foi de apenas 4%.

## **5 – Agradecimentos**

Os autores agradecem a Bernardo Rudorff pela cessão de dados do projeto CANASAT e aos comentários e sugestões dos revisores, que contribuíram para a melhoria do artigo.

## 6 - Referências

BRASIL. Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento. Assessoria de Gestão Estratégica. **Projeções do agronegócio mundial e Brasil 2006/07 a 2017/18**. Brasília, DF: AGE, 2008. 58 p.

AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; FEITOSA, F. F.; GONÇALVES, F. G.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Análise espacial da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: a influência da precipitação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2231-2238.

ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar**. 2008. 164 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 106, p. 137-145, 2007.

BUITEN, H. J.; CLEVERS, J. G. **Land observation by remote sensing: theory and applications**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publications, 1993. 642 p. (Current Topics in Remote Sensing, v. 3).

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat7**. 2003. 147 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba.

GALFORD, G. L.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J.; GENDRIN, A.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, p. 576-587, 2008.

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

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

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

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

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT: a program for analysing time-series of satellite sensor data. **Computers and Geosciences**, Oxford, v. 30, p. 833-845, 2004.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. **TIMESAT**: a program for analyzing time-series of satellite sensor data. Users Guide for TIMESAT 2.3. Lund: Lund University, 2006. 39 p.

KASTENS, J. H.; KASTENS, T. L.; KASTENS, D. L. A.; PRICE, K. P.; MARTINKO, E. A.; LEE, R. -Y. Image masking for crop yield forecasting using AVHRR NDVI time series imagery classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 99, p. 341-356, 2005.

LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 823-870, 2007.

LUCAS, A. A.; SCHULER, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 607-614, 2007.

LUNETTA, R. S.; KNIGHT, J. F.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J. G.; WORTHY, L. D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 105, p. 142-154, 2006.

MACHADO, H. M. **Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 - ETM+**. 2003. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas.

MELO, C. O.; ESPERANCINI, M. S. T.; SILVA, G. H. Sazonalidade de preços da cana-de-açúcar no Estado do Paraná. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais eletrônicos...** Brasília, DF: SOBER, 2008. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/9/32.pdf>>. Acesso: 16 dez. 2009.

PELLEGRINO, G. O. **Utilização de dados espectrais do satélite NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-açúcar**. 2001. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; VON ZUBEN, F. J. Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar: estudo de caso Usina Catanduva. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 217-224.

PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 331-333.

REN, J.; CHEN, Z.; ZHOU, Q.; TANG, H. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, p. 403-413, 2008.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; XAVIER, A. C.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano-safra 2003/04. **Agricultura em São Paulo**, v. 52, n. 1, p. 21-39, 2005.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007. 423 p.

SATOLO, L. F. **Dinâmica econômica das flutuações na produção de cana-de-açúcar**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

VIEIRA JÚNIOR, P. A.; VIEIRA, A. C. P.; BUAINAIN, A. M.; LIMA, F. de.; SILVEIRA, J. M. F. J. da. Produção brasileira de cana-de-açúcar e deslocamento da fronteira agrícola no Estado do Mato Grosso. **Informações Econômicas**, v. 38, n. 4, p. 58-77, 2008.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L.; KASTENS, J. H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 108, p. 290-310, 2007.

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

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, Nova York, v. 84, p. 471-475, 2003.



---

## ***Monitoramento por Satélite***

***Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***  
***Av. Soldado Passarinho 303 Fazenda Chapadão***  
***13070 115 Campinas SP***  
***Telefone (19) 3211 6200 Fax (19) 3211 6222***  
***www.cnpm.embrapa.br sac@cnpm.embrapa.br***