

# Utilização de séries temporais de imagens do sensor AVHRR/NOAA-17 e modelo matemático na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Cristina Rodrigues Nascimento<sup>1</sup>  
Jurandir Zullo Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola  
UNICAMP/FEAGRI  
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas - SP, Brasil  
cristina.nascimento@agr.unicamp.br

<sup>2</sup> Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura –  
CEPAGRI/UNICAMP  
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas - SP, Brasil  
jurandir@cpa.unicamp.br

**Abstract:** Brazil is the first producer of sugar cane in the world. Despite the economic and social importance of agribusiness to Brazil, it is still very difficult to estimate the harvest of the its main crops with the precision and anticipation needed, justifying the study and development of new methods based on the use of remote sensing data. Thus the present study had two main aims: i) Assess and adjust a mathematical model proposed by Pelegrino (2001) and ii) Assess the yield of sugar cane through the use of a time series of AVHRR/NOAA images, based on the response of the NDVI vegetation index. The results are promising, since was possible to get errors less than 5% in estimating the productivity of sugar cane from 110 to 150 days in advance of the next season. The use of time series of AVHRR/NOAA images presented a very satisfactory outcome, allowing an increase of the objectivity of the methods of agricultural monitoring.

**Palavras-chave:** Image processing, Time Series, NDVI, Processamento de imagens, Série Temporal, NDVI.

## 1. Introdução

O Brasil é, hoje, o principal produtor de cana-de-açúcar do mundo sendo que seus produtos são largamente utilizados na produção de açúcar, álcool combustível e, mais recentemente, biodiesel. A safra agrícola passou de 57,8 milhões de toneladas em, 1990/91, para 129,68 milhões de toneladas, em 2003/04, enquanto que a área plantada cresceu de 37,8 milhões de hectares para 46,6 milhões de hectares, no mesmo período (Marques, 2006). Apesar da evolução e importância econômica e social do agronegócio para o Brasil, existe, ainda, uma grande dificuldade em estimar com a precisão e a antecipação necessárias a safra das principais culturas agrícolas do país, o que justifica o estudo e a elaboração de metodologias empregando o sensoriamento remoto para essa finalidade.

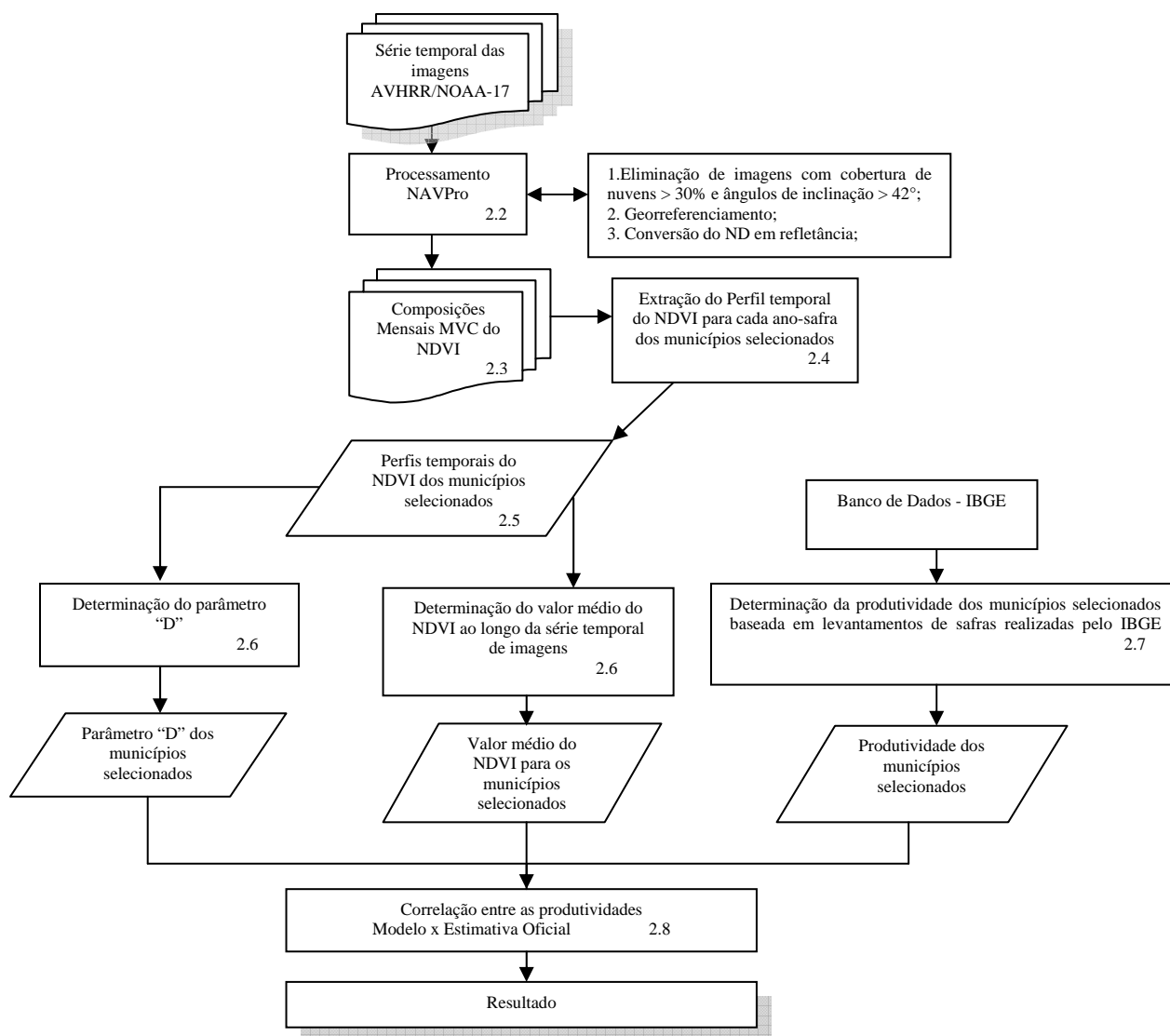
Dentre os vários sistemas orbitais existentes atualmente, os satélites da série AVHRR/NOAA têm grande potencial de aplicação em métodos operacionais e objetivos de previsão de safras, pois possibilitam a obtenção de coberturas globais diárias a partir de pelo menos dois satélites devidamente sincronizados e com resolução temporal de doze horas. O Cepagri (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicada à Agricultura) opera um sistema de recepção destas imagens desde 1995, totalizando, aproximadamente, 5TB, em julho de 2008. O tamanho desta série de imagens tem, sem dúvida, um valor inestimável para as pesquisas na agricultura, devido à diversidade de condições climáticas registradas desde abril de 1995 e à grande evolução da agricultura no país.

A utilização de um grande volume de dados é útil para reduzir as limitações do AVHRR/NOAA quanto à sua resolução espacial, em aplicações de real interesse prático, como o apoio à estimativa de safras agrícolas com maior objetividade e antecipação. Além

disso, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas a sensores de moderada e baixa resolução espacial e alta frequência temporal é fundamental para a obtenção de informações atualizadas de regiões extensas, o que tem dado origem à procura de novas técnicas de processamento e análise para este tipo de informação (Pardi Lacruz, 2006). Sendo assim o presente trabalho teve dois objetivos: i) Avaliar e Ajustar um modelo matemático-espectral proposto por Pelegrino (2001) e ii) Avaliar o comportamento produtivo da cana-de-açúcar através da exploração de informações da série temporal de imagens AVHRR/NOAA, em função da resposta do índice de vegetação NDVI no fornecimento de informações objetivas da produtividade da cana-de-açúcar.

## 2. Metodologia de Trabalho

A Figura 1 apresenta a metodologia utilizada no trabalho. Os itens no canto inferior direito dos símbolos indicam a seqüência descritiva das etapas.



**Figura 1. Metodologia adotada na obtenção da produtividade através do modelo matemático-espectral e posterior comparação com estimativas oficiais – IBGE.**

## **2.1 Área de Estudo: Série Temporal de Imagens AVHRR/NOAA**

Foram utilizadas séries temporais de imagens do sensor AVHRR/NOAA, de três anos-safra (período que compreende ao mês de abril de um ano a março do ano seguinte), para as safras 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 de quatro municípios: Jaboticabal, Pitangueiras, Ribeirão Preto e Sertãozinho. As imagens foram obtidas diretamente do banco de imagens NOAA, disponíveis no Cepagri.

## **2.2 Processamento NAVPro: Georreferenciamento e Geração das imagens NDVI no Programa NAVPro (*Navigation Products*)**

O georreferenciamento é um fator preponderante quando se pretende explorar a alta resolução temporal do sensor AVHRR/NOAA. Neste sentido Esquerdo et al (2006), em parceria com a universidade do Colorado (Colorado Center for Astrodynamics Research - CCAR), adaptou um sistema automático para o georreferenciamento preciso das imagens e posterior geração de produtos. O pacote é composto por uma série de programas executados via linha de comandos no IDL (*Interactive Data Language*), necessitando de um conjunto de imagens (série temporal) para geração dos produtos finais. O processamento no NAV inclui: Conversão das imagens do formato HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) “raw data” para o formato CCAR, bastante similar ao Level 1B; transformação dos níveis de cinza das imagens dos canais 1 e 2 para valores de refletância no topo da atmosfera; mascaramento de nuvens; geração de imagens NDVI e geração das composições de máximo valor ou MVC do índice de vegetação NDVI.

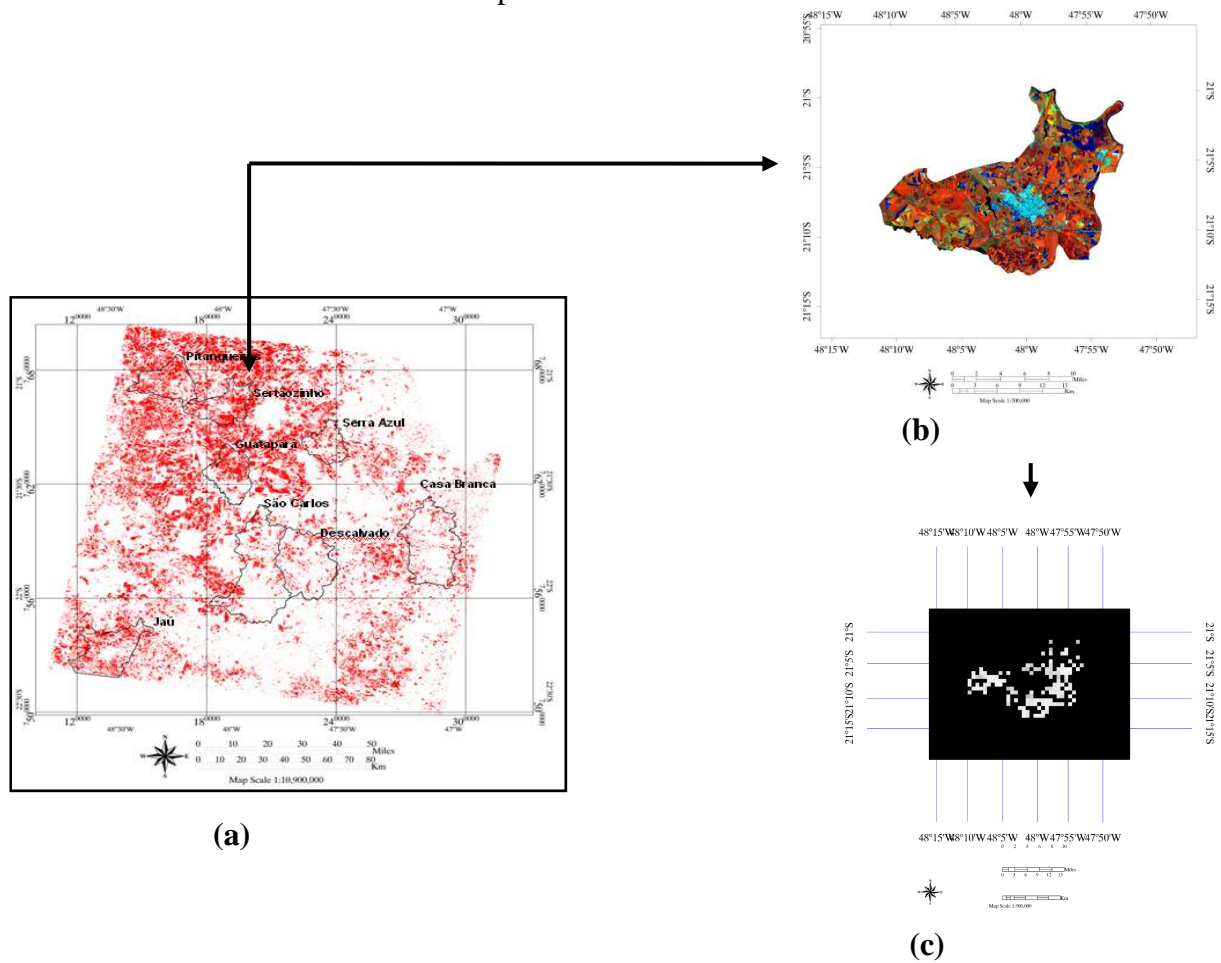
## **2.3 Geração das composições mensais (MVC) do índice de vegetação NDVI**

Composições de máximo valor, ou MVC (*Maximum Value Composition*) são largamente utilizadas, a fim de minimizar a influência de nuvens e os efeitos atmosféricos. Este método vem sendo largamente utilizado em dados de NDVI, onde o valor máximo de um dado pixel numa série temporal de imagens é utilizado para a construção de uma composição máxima de um dado período. As composições de máximo valor no intervalo mensal foram geradas automaticamente por meio da rotina IDL acima descrita. O processamento exclui imagens com mais de 30% de cobertura de nuvens em razão do sombreamento dos pixels, que proporciona um “mascaramento” do valor do NDVI. Esse parâmetro tem sido utilizado com sucesso na estimativa de produtividade em diversas culturas (Taylor et al, 1998; Qi et al.,1994). Foram descartadas, também, imagens com ruídos de aquisição e as obtidas em passagens com baixo grau de elevação (ângulo zenital solar maior que 70° e ângulos de varredura maiores que 42°, em relação à estação de recepção, recebendo valores de -1,1) do satélite devido à dificuldade na realização da correção geométrica.

## **2.4 Geração do perfil temporal do índice de vegetação NDVI**

Para a geração do perfil temporal da série de imagens dos municípios selecionados, foram considerados apenas os pixels com cana-de-açúcar. Foi utilizado como referência terrestre na identificação das áreas com cana-de-açúcar, o mapeamento que vem sendo realizado no projeto CANASAT/INPE. Os vetores considerados para análise (safras 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006) correspondem à órbita/ponto 220/75 das imagens do satélite LANDSAT, onde se concentram todos os municípios selecionados.

A Figura 3 mostra a metodologia empregada na separação dos pixels e posterior extração dos valores médios mensais do NDVI para cada ano-safra.



**Figura 3. Metodologia empregada na separação dos pixels e posterior extração dos valores médios mensais do NDVI para cada ano-safra. Os itens (a), (b) e (c) representam respectivamente, o mapeamento das áreas de cana-de-açúcar da safra 2004/2005 para Sertãozinho (imagem LANDSAT) e os pixels utilizados na análise.**

## 2.5 Perfil Temporal dos Municípios

A partir do item 2.4 foram gerados os perfis temporais do NDVI dos quatro municípios selecionados, considerando-se apenas os pixels mapeados com cana-de-açúcar.

## 2.6 Modelo Matemático-Espectral

O modelo testado foi desenvolvido por Pellegrino (2001) e utiliza informações espectrais, representada pelo índice de vegetação NDVI, com o objetivo de estimar a produtividade final da cultura de cana-de-açúcar a partir dos dados do satélite AVHRR/NOAA. A obtenção da produtividade final está baseada em três equações que correlacionam dados de produção instantânea, ou massa seca dos colmos (MSC), medida um determinado número de “Dias após o corte” (D). A base do modelo proposto por Pellegrino (2001) é representado na Equação 1.

$$MSC = NDVI * (-325,394) + D * 17,1384 + (- 963,69) \quad R^2 = 0,9567 \quad (1)$$

Segundo Pellegrino (2001), a variável “D” funciona como fator de ponderação do NDVI e, indiretamente, representa o acúmulo de energia ao longo do ciclo, comumente expresso na forma de Graus-Dia ou na relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial. As variáveis numéricas representam os coeficientes de ajuste do modelo. A partir da Equação 1 é calculado a estimativa da produtividade final com base no modelo de crescimento (Equações 2 e 3).

$$MSC_{\text{proporcional}} = 1,309664 * 10^{(-16)} * D^{(11,33342 - 1,995582 * \log(D))} \quad R^2 = 0,9866 \quad (2)$$

A  $MSC_{\text{proporcional}}$  é a Massa Seca dos Colmos Proporcional, ou seja, normalizada em relação a MSC (Massa Seca dos Colmos). Esta equação ressalta o comportamento da cultura ao longo do ciclo de crescimento e procura, como já mencionado, minimizar a expressão da condição meteorológica, que seria a responsável principal pelas diferenças na produção final entre os ciclos (safra), em função do termo “D”. A última etapa é o cálculo da Massa Seca Máxima do Ciclo (ano-safra) ( $MSC_{\text{Max}}$ ) para à estimativa final da produtividade.

$$MSC_{\text{Max}} = MSC / MSC_{\text{Proporcional}} \quad (3)$$

A partir da avaliação do perfil temporal do NDVI dos municípios selecionados, foi definido a variação do parâmetro “D” entre 90 e 300 dias, ou seja, entre os meses de julho e fevereiro. Este período está diretamente relacionado com a diminuição e o aumento dos valores do NDVI, respectivamente representando o período de colheita (diminuição dos valores do NDVI) e o crescimento vegetativo da cultura onde é encontrado o pico dos valores do NDVI ao longo da série temporal de imagens.

## 2.7 Estimativa da Produtividade Oficial: IBGE

O cálculo da produtividade foi realizado através dos dados de produção e área plantada, obtidos no IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, para 2004, 2005 e 2006. A Tabela 1 apresenta o cálculo da produtividade fornecido pelo IBGE para os seis municípios selecionados, baseado nos dados relacionados acima.

O principal enfoque da pesquisa é extrapolar a pesquisa antes desenvolvida por Pellegrino (2001) em nível de talhão para um nível regional, podendo obter a produtividade da cana-de-açúcar com dias de antecedência (parâmetro “D”) em relação à estimativa oficial.

**Tabela 1. Valores de Produtividade para as safras 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006 obtidos através das estimativas de área plantada e produção fornecidos pelo IBGE.**

<i>MUNICÍPIOS</i>	<i>PRODUTIVIDADE</i>	<i>PRODUTIVIDADE</i>	<i>PRODUTIVIDADE</i>
	<i>(ton/ha)</i>	<i>(ton/ha)</i>	<i>(ton/ha)</i>
	<i>SAFRA 2003/2004</i>	<i>SAFRA 2004/2005</i>	<i>SAFRA 2005/2006</i>
<i>Jaboticabal/SP</i>	87,80	92,00	90,00
<i>Pitangueiras/SP</i>	89,71	86,89	86,89
<i>Ribeirão Preto/SP</i>	70,00	72,43	70,00
<i>Sertãozinho/SP</i>	80,00	82,14	80,00

## 2.8 Cálculo do Erro (%): Comparação entre as estimativas de Produtividade do Modelo e a Produtividade Oficial - IBGE

O cálculo do erro médio em porcentagem entre as estimativas de produtividade obtidas com o modelo e a estimativa oficial fornecida pelo IBGE, foi obtido a partir da Equação 4.

$$\text{Erro}(\%) = ((\text{Produtividade}_{\text{IBGE}} - \text{Produtividade}_{\text{MODELO}})/(\text{Produtividade}_{\text{IBGE}})) * 100 \quad (4)$$

### 3. Resultados e Discussão

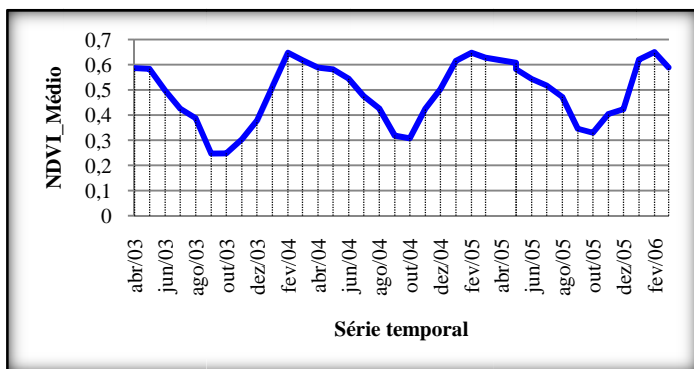
No período de abril de 2003 a março de 2006 foram processadas 399 imagens: 134 na Safra 2003/2004, 93 na Safra 2004/2005 e 172 na Safra 2005/2006 (Figura 3). Como já descrito no item 2.2, imagens com mais de 30% de cobertura de nuvens, com ruídos de aquisição e obtidas em passagens com baixo grau de elevação foram descartadas. O processamento pode gerar imagens com erros nos cálculos de altitude, erros de georreferenciamento superiores a um pixel e falhas na calibração radiométrica. Imagens com esse perfil também são descartadas.

Aplicando-se os dados de NDVI e Dias Após o Corte (variando num intervalo de 90 a 300 dias – julho a fevereiro) à Equação 1, obtiveram-se os valores de Massa Seca de Colmos que associado ao modelo de crescimento (Equações 2 e 3) estimou a produtividade final da cana-de-açúcar para cada ano-safra. A Figura 4 apresenta a série temporal dos valores de NVI e o erro (%) variando de acordo com intervalo do “D”. A Tabela 2 apresenta a Massa Seca Máxima, a produtividade oficial em ton/ha e o erro% para os quatro municípios, nas diferentes safras, para o “D” com menor erro%.

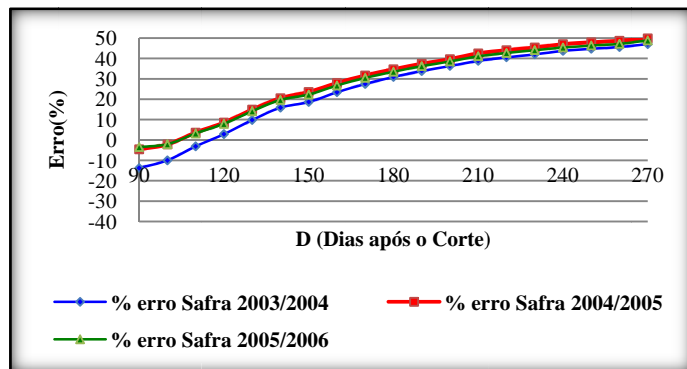
**Tabela 2. Resultados da MSC Máxima do Ciclo estimada pelo modelo e o erro em % nas diferentes safras.**

<i>Safra 2003/2004</i>				
<i>Municípios</i>	<i>D</i>	<i>Prod. IBGE</i>	<i>Prod. Modelo MSC Máxima</i>	<i>Erro%</i>
Jaboticabal	110	87,80	85,26	2,89
Pitangueiras	110	89,71	86,13	3,99
Ribeirão Preto	150	70,00	66,76	4,61
Sertãozinho	120	80,00	78,66	1,67
<i>Safra 2004/2005</i>				
<i>Municípios</i>	<i>D</i>	<i>Prod. IBGE</i>	<i>Prod. Modelo MSC Máxima</i>	<i>Erro %</i>
Jaboticabal	100	92,00	88,65	3,64
Pitangueiras	110	86,89	84,07	3,23
Ribeirão Preto	140	72,43	69,64	3,85
Sertãozinho	120	82,14	73,43	5,74
<i>Safra 2005/2006</i>				
<i>Municípios</i>	<i>D</i>	<i>Prod. IBGE</i>	<i>Prod. Modelo MSC Máxima</i>	<i>Erro %</i>
Jaboticabal	100	90,00	87,08	3,24
Pitangueiras	110	86,89	82,97	4,50
Ribeirão Preto	140	70,00	69,37	0,89
Sertãozinho	120	80,00	76,88	3,89

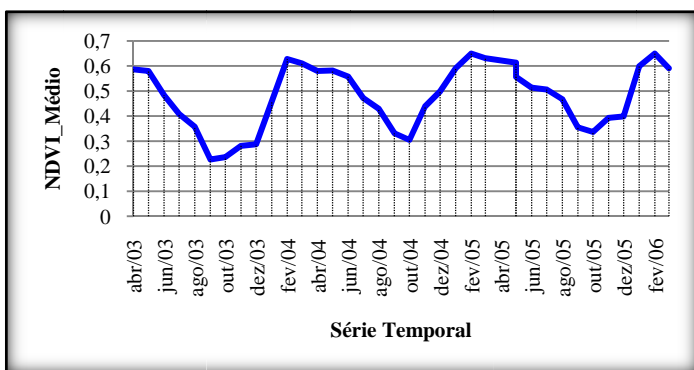
*Jaboticabal\_Perfil*



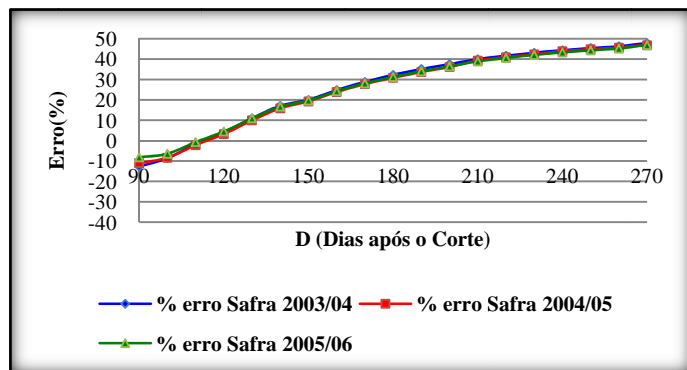
*Jaboticabal\_Erro(%)*



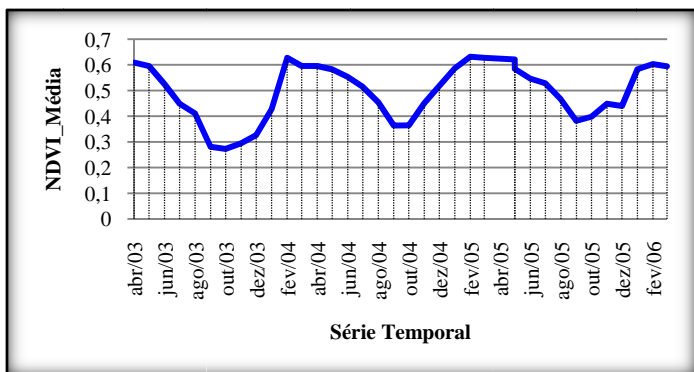
*Pitangueiras\_Perfil*



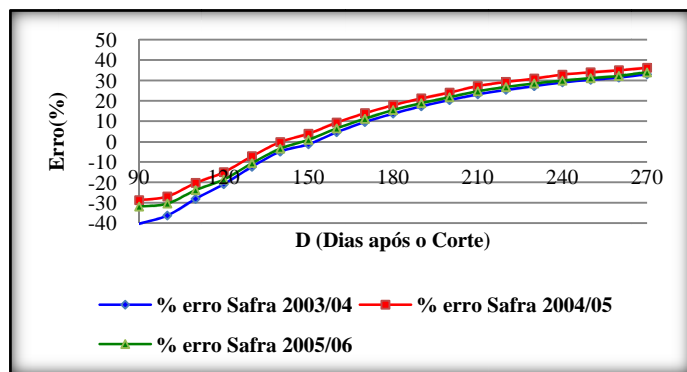
*Pitangueiras\_Erro(%)*



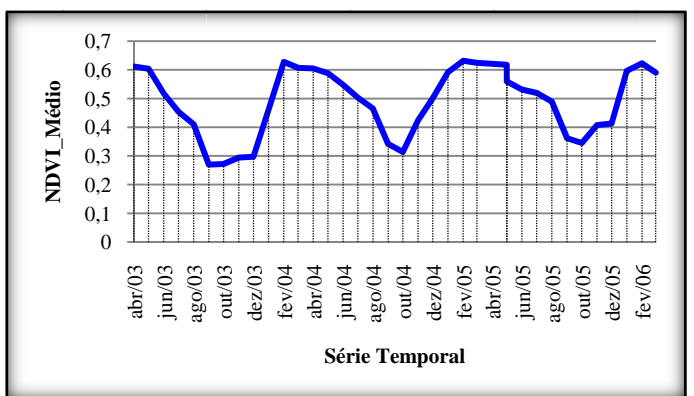
*Ribeirão Preto\_Perfil*



*Ribeirão Preto\_Erro(%)*



*Sertãozinho\_Perfil*



*Sertãozinho\_Erro(%)*

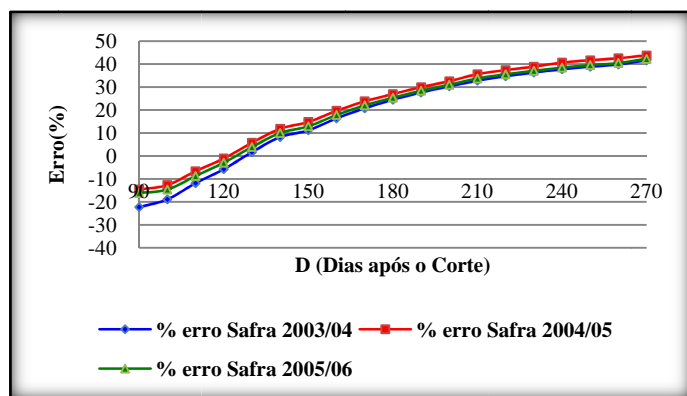


Figura 4. Perfil Temporal e Erro(%) dos municípios estudados nos diferentes anos-safras.

Pode-se notar que os valores de NDVI do meio do ciclo (90 a 150 dias) da cultura foram os que apresentaram maiores correlações com o dado oficial. Após os 150 dias (exceto para Ribeirão Preto) os erros são superiores a 20%, insatisfatório para ser empregado na previsão de safra. A produtividade estimada é considerada satisfatória e apresentam erros inferiores a 10% até 130 dias (Jaboticabal, Pitangueiras e Sertãozinho) e 170 para Ribeirão Preto após o corte, período que vai do início de julho ao final de agosto. Com um valor de “D” inferior a 90 dias o modelo gera erros negativos.

#### 4. Conclusão

Os resultados da metodologia utilizada foram promissores, pois conseguiu-se obter erros inferiores a 5% na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar com aproximadamente 110 a 150 dias de antecedência em relação à próxima safra. A utilização de séries temporais de imagens do AVHRR/NOAA apresentou um resultado bastante satisfatório, possibilitando um aumento da objetividade dos métodos de acompanhamento e previsão de safras.

#### 5. Referência Bibliográfica

Esquerdo, J. C. D. M.; Antunes, J. F. G.; Emery, W.; Baldwin, D. G; Zullo Júnior, J. An Automatic System for AVHRR Land Surface Product Generation. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.18, p. 3925 - 3942, 2006.

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

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

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

Pellegrino, G.Q. Utilização de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR como Fonte de Dados para Modelos Matemáticos de Estimativa da Fitomassa da Cana-de-Açúcar 2001. 116 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.

Qi, J.; Chehbouni, A.; Huete, A.R.; Kerr, Y.H.; Sorooshian, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, v. 48, p. 119-126, 1994.