

Utilização de Séries Temporais de Imagens AVHRR/NOAA no apoio à Estimativa Operacional da Produção da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Cristina Rodrigues Nascimento¹
Jurandir Zullo Junior²

¹ Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Ciências Agrárias (ICA) - Campus Regional de Montes Claros
Avenida Universitária, 1.000, Bairro Universitário – Montes Claros/MG – CEP: 39.404-006
crisrodnas@gmail.com

² 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 world producer of sugar cane. The State of Sao Paulo is the first national producer of sugar cane, contributing with more than 60% of national production. Due to the high relevance of production, it is important to have insurance estimates and surveys of areas cultivated with the crop. The progress of the different remote sensing techniques has allowed to use satellite images to monitor and assist the estimation of these areas. There are numerous options, including images from the AVHRR/NOAA. Combining the need to obtain more precise estimates of the yields of cane sugar, with the potential to acquire agricultural information culture through the NDVI, this study explored the time series analysis of NDVI/AVHRR images and the identification of areas with sugar cane in the State of Sao Paulo. The results indicate that areas with sugar cane are well modeled, from the harmonic analysis, the five crops examined, allowing them to differentiate them from other cultures, the RGB compositions used according to their growing seasons. From the supervised classification using the maximum likelihood algorithm of image amplitude, phase and additive term was generated a map representing the spatial distribution of culture in the state in the crop-season 03/04, 04/05, 05/06, 06/07 and 07/08. The results obtained in each crop-season were compared with as reference, provided by the project CANASAT/INPE. It was found that the smaller relative errors, around 10% for the season 07/08, were found from the estimate based on the error matrix.

Palavras-chave: Sugar cane, NDVI, time series, harmonic analysis, cana-de-açúcar, NDVI, séries temporais, análise harmônica.

1. Introdução

O Brasil é o principal produtor atual de cana-de-açúcar do mundo. Seus produtos são largamente utilizados na produção de açúcar, álcool combustível e, mais recentemente, biodiesel. Apesar da evolução e da importância econômica e social do agronegócio para o Brasil, existe, ainda, uma grande dificuldade em estimar com a precisão e a antecipação necessárias a safra das principais culturas agrícolas do país, o que justifica o estudo e a elaboração de metodologias empregando, por exemplo, técnicas como o sensoriamento remoto. A agilidade e a disponibilidade de informações precisas podem facilitar a elaboração de estratégias referentes ao armazenamento, comercialização e suporte às decisões (PONTES, 2003). Dentre os vários sistemas orbitais existentes os satélites meteorológicos da série AVHRR/NOAA (*Advanced very high resolution radiometer/National oceanic and atmospheric administration*) têm grande potencial de aplicação em métodos operacionais e objetivos de previsão de safras, pois possibilitam a obtenção de coberturas globais diárias a partir satélites devidamente sincronizados e com resolução temporal de doze horas.

O CEPAGRI (Centro de pesquisa meteorológica e climática aplicada à agricultura) opera um sistema de recepção das imagens AVHRR/NOAA desde 1994, totalizando, aproximadamente, 6TB (Terabyte) de dados gravados, de abril de 1995 a maio de 2010. O

tamanho dessa série de imagens tem, sem dúvida, um valor inestimável para as pesquisas na agricultura. A utilização de um grande volume de dados é útil para reduzir as limitações do AVHRR/NOAA quanto à sua resolução espacial, em aplicações de real interesse prático, como o apoio ao acompanhamento e a estimativa de safras agrícolas com maior objetividade e antecipação possível. Além disso, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto com base em sensores com resolução espacial moderada a baixa e frequência temporal alta é fundamental para a obtenção de informações atualizadas de regiões extensas, o que favorece a procura de pesquisas e o desenvolvimento de novas técnicas de processamento e análise desse tipo de dado (PARDI LACRUZ, 2006).

Um dos produtos derivados dessas imagens é o índice de vegetação NDVI (Índice de vegetação da diferença normalizada), utilizado amplamente ao longo de vários anos, e que apresenta correlação com a biomassa, sendo um bom estimador desse parâmetro (DEFRIES et al., 1995; REED et al., 1994; LLOYD, 1990). Uma das metodologias que vem sendo estudada em séries de imagens NDVI/AVHRR é a análise harmônica, técnica comumente aplicada a dados meteorológicos, que permite integrar as características temporais das séries de imagens com a informação espacial e espectral da mesma, obtendo assim informações de grande utilidade para a identificação e o monitoramento de áreas naturais e também de atividades antrópicas.

Diante do exposto, esse trabalho partiu do problema da subjetividade dos sistemas de monitoramento e previsão de safra para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Partindo-se desse problema, o objetivo geral foi definido considerando a seguinte hipótese: “A utilização de informações temporais obtidas a partir de séries de imagens do sensor AVHRR/NOAA-17 pode fornecer subsídios para o mapeamento e/ou identificação das áreas plantadas e a estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, tornando os sistemas de monitoramento e previsão de safras da cultura mais objetivos”. Para testar essa hipótese, foi estudada a série temporal das imagens NDVI/AVHRR-17 de modo a identificar os pixels com potencial de corresponderem a plantios de cana-de-açúcar em dez municípios do estado, através do resultado da classificação supervisionada aplicada a resposta do termo aditivo, fase e amplitude, derivados da análise harmônica em função da estimativa de área baseada na matriz de erro e na expansão direta.

2. Metodologia de Trabalho

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

2.2 Georreferenciamento e Geração das imagens NDVI no Programa NAVPro (Navigation Products): A questão geométrica das imagens 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 dessas imagens e posterior geração de produtos. O pacote é composto por uma série de programas executados via linha de comando 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 Composições mensais (MVC) do índice de vegetação NDVI: As composições de máximo valor no intervalo mensal foram geradas automaticamente por meio da rotina IDL acima descrita. O processamento excluiu 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 Identificação dos pixels com cana-de-açúcar: Foi utilizado como referência terrestre na identificação das áreas com cana-de-açúcar o mapeamento que vem sendo realizado pelo CTC (Centro de Tecnologia Canavieira) em parceria com o CANASAT/INPE para todas as safras analisada. Os vetores considerados para análise correspondem à órbita/ponto 220/75 das imagens do satélite LANDSAT, onde concentram-se grande parte dos principais municípios produtores. Devido à resolução espacial do sensor AVHRR em relação ao sensor ETM+ foi considerado para análise apenas os pixels puros, ou seja, aqueles que representam exclusivamente áreas com cana-de-açúcar.

2.5 Análise Harmônica: Os algoritmos para aplicação da análise harmônica na série temporal de imagens NDVI/AVHRR foram implementados também em linguagem IDL, segundo metodologia proposta por PARDI LACRUZ (2006). O algoritmo original foi desenvolvido para imagens do sensor MODIS/TERRA, que apresenta resoluções radiométricas e espaciais diferentes do sensor AVHRR/NOAA. Para aplicar o mesmo algoritmo da análise harmônica na série temporal de imagens do AVHRR/NOAA, foi necessário converter a resolução radiométrica de 16 para 10 bits e alterar o índice de vegetação EVI para NDVI, com escala -1 a 1. O intervalo dos valores do NDVI foram re-escalados para uma escala de 0 a 200, segundo metodologia proposta por JAKUBAUSKAS (2001). Os dados de entrada, no algoritmo de análise harmônica, foram meta-arquivos criados no ENVI contendo 12 imagens NDVI/MVC, para cada ano-safra, totalizando uma série de 60 composições NDVI/MVC. Como resultado desse processamento, foram obtidas imagens termo aditivo, amplitude, fase e variância.

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

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

2.8 Cálculo das áreas com cana-de-açúcar nos municípios estudados: O cálculo da área de cana-de-açúcar, dos dez municípios selecionados foi realizada de duas maneiras: a partir da matriz de erro (ME) e através da expansão direta (ED). Para cada mapeamento correspondente aos cinco anos-safra analisados, foram selecionados 100 pontos amostrais fixos por município. A seleção dos pontos foi realizada por meio de amostragem aleatória simples que consistiu na seleção de uma amostra do total populacional de tal forma que qualquer possível amostra tivesse uma mesma probabilidade de ser escolhida (ANTUNES, 2005).

3. Resultados e Discussão

Com o resultado do processamento das imagens AVHRR/NOAA-17, foi selecionada uma série temporal composta de 766 imagens, corrigidas radiometricamente, geometricamente, dos cinco anos-safra considerados. A Tabela 1 apresenta o total mensal e anual das imagens corrigidas para a área em estudo. É possível perceber que nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro obtiveram-se poucas imagens corrigidas, pois são meses da estação chuvosa, e nesta época as imagens apresentam grande cobertura de nuvens. O contrário acontece nos meses de julho e agosto, considerados secos, onde o número de imagens processadas é elevado em relação aos demais meses.

Tabela 1. Número de imagens utilizadas na geração das composições mensais de máximo valor (MVC/NDVI).

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

Vale ressaltar que embora a safra 03/04 tenha apresentado um total de 134 imagens, processadas e/ou corrigidas, ela se caracterizou pela presença de composições geradas a partir de um número reduzido de imagens, o que aumenta a área de pixels inaptos no estado, principalmente nos meses de dezembro a março. Para os anos-safra 05/06, 06/07 e 07/08, observou-se um aumento gradativo do total de imagens, o que está diretamente relacionado

com a troca da antena de recepção das imagens AVHRR/NOAA, em 2005, por uma mais moderna, cuja característica principal é a diminuição da quantidade de ruídos.

Como resultado da aplicação do algoritmo da análise harmônica, foram geradas as imagens termo aditivo, amplitude, fase e variância para cada ano-safra, a partir do algoritmo implementado, em linguagem *IDL* e executado em ambiente *ENVI 4.3*. Os dados de entrada necessários para a geração das imagens relacionadas acima, para um número N de harmônicos, foram meta-arquivos contendo conjuntos de imagens separados por ano-safra (Tabela 2).

Tabela 2. Total de imagens utilizadas na composição dos meta-arquivos de entrada no algoritmo da análise harmônica e harmônicos resultantes.

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

O número máximo de harmônicos que pode ser calculado é igual ao número de imagens (n) dividido por dois ($n/2$). A separação, por ano-safra está diretamente relacionada à caracterização da dinâmica da cana-de-açúcar nos municípios estudados, bem como à evolução dessas áreas ao longo do tempo (cinco safras). Para avaliar essa dinâmica de crescimento, cada meta-arquivo gerado numa dada safra é composto da sua série de imagens e da série anterior, isso equivale, que tomando, por exemplo, a safra 04/05, o meta-arquivo gerado irá conter uma série total de 24 imagens, sendo este arquivo gerado da junção das 12 imagens da safra 03/04 e das 12 imagens correspondentes a safra em questão, no caso 04/05. Esta metodologia foi adotada sucessivamente para as demais safras estudadas. A Figura 1 mostra os dados originais do perfil temporal do MVC/NDVI e a curva de ajuste do perfil obtida através da técnica de análise harmônica, para a série temporal desses valores nas cinco safras analisadas.

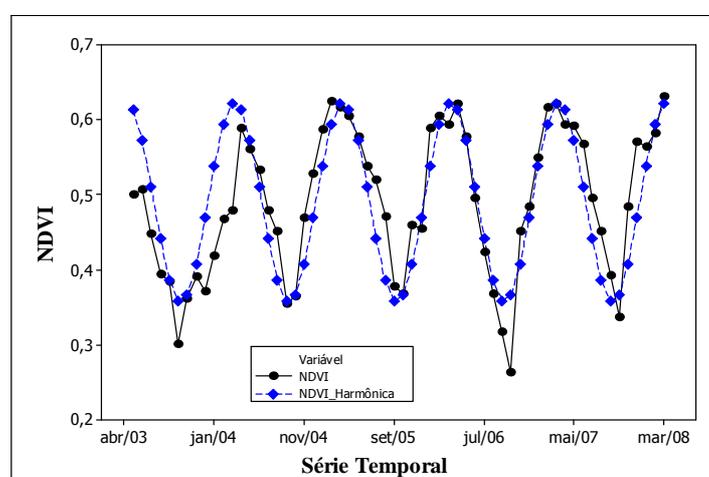


Figura 1. Curva original e curva ajustada através da análise harmônica do perfil temporal da série MVC/NDVI, dos cinco anos-safra analisados.

Pode-se perceber que a resposta obtida a partir da metodologia empregada, é a que reproduz melhor a série temporal em estudo. Este ajuste bom ocorreu porque a forma do ciclo anual do parâmetro em questão é aproximadamente senoidal, com um ciclo completo executado nos 12 meses da série temporal de cada ano-safra. Além dessa característica a análise harmônica funciona como um filtro para eliminar pequenas variações nas composições MVC/NDVI derivadas de nuvens e ruídos. Pela análise de variância, Tabela 3, verificou-se diferença significativa ($P < 0,05$) entre as safras apenas nas imagens amplitude. As diferenças entre as médias das safras para o termo aditivo e a imagem variância não foram significativas ($P > 0,05$). A resposta da análise de variância está diretamente relacionada com a presença de ruídos nas imagens, que é mais sensível nas imagens amplitude que estão diretamente relacionadas com a variação máxima do NDVI para cada ano-safra ao longo da série temporal de imagens. Nota-se que não há diferença significativa, nos valores de amplitude, para as demais safras (04/05, 05/06, 06/07 e 07/08).

Tabela 3. Média e desvio padrão dos termos harmônicos analisados, para os cinco anos-safras considerados no estudo.

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

A base para identificação e/ou acompanhamento da evolução das áreas de cana-de-açúcar ao longo do tempo foram às composições coloridas *falsa-cor*/RGB, representando, respectivamente as imagens amplitude (R), termo aditivo (G) e fase (B), cujos harmônicos foram selecionados de acordo com a resposta da cultura. Tomou-se o ano safra 2007/2008 como referência para análise, pois este considera a resposta da evolução dessas áreas ao longo do tempo em função da resposta das quatro safras anteriores. A Figura 2 apresenta a composições coloridas - RGB, obtida da safra 07/08. Visualmente, áreas em tons de *magenta* apresentam potencial de pertencerem à classe cana-de-açúcar, quando comparados com o levantamento das áreas da cultura no estado realizados pelo projeto CANSAT/INPE.

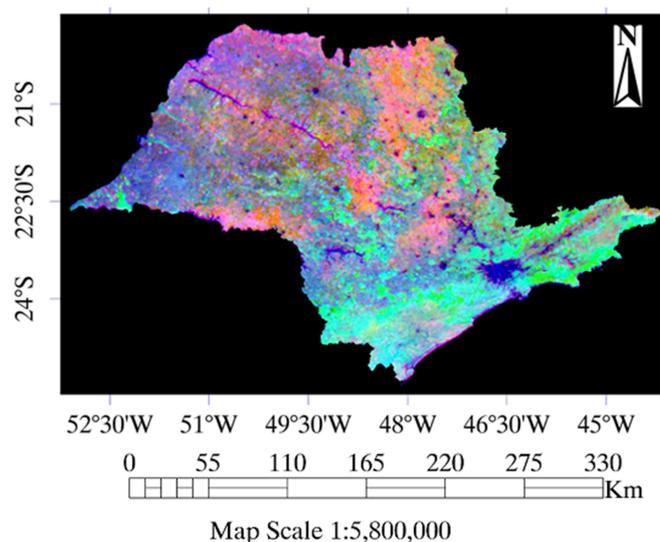


Figura 2. Composição RGB: R (amplitude - 5º harmônico), G (termo aditivo) e B (fase) para a safra 07/08.

A partir do resultado da classificação supervisionada, foi calculada a área de cana-de-açúcar em cada um dos dez municípios analisados. Os resultados são apresentados na Tabela 4. Abaixo relacionada.

Tabela 4. Comparação entre as estimativas de área, em hectares, de cana-de-açúcar para a safra 07/08.

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

De maneira geral, para safra 07/08 analisada, os municípios de Araras, Pitangueiras, Pontal, Ribeirão Preto e Sertãozinho foram os que apresentaram os melhores resultados, na estimativa da área de cana-de-açúcar, quando considerada a determinação desse parâmetro a partir da ME. Embora os erros sejam superiores a 5%, vale ressaltar que as estimativas obtidas basearam-se em métodos totalmente objetivos, utilizando imagens AVHRR/NOAA com pixel de 1,1 x 1,1km, ao contrário das estimativas de área de cana, tomada como referência, que embora sejam também objetivas, são realizadas tomando-se como base para os mapeamentos imagens LANDSAT com pixel de 30 x 30m. A classificação, foi considerada boa (segundo resposta do índice Kappa), indicando que a análise harmônica é uma metodologia viável, na identificação da cultura em questão, mesmo utilizando algoritmos mais simples de classificação supervisionada. Apesar da expansão direta também levar em consideração o resultado da classificação, este método não apresentou resultados que fossem coerentes (em relação aos erros obtidos), para serem utilizados em um sistema de suporte à previsão de safra, de acordo com a metodologia proposta no estudo, quando comparado com matriz de erro. De acordo com o valor obtido com a correlação de Pearson (r) entre o CANASAT e as estimativas de área por expansão direta ($r = 0,82$) e matriz de erro ($r = 0,99$), para os municípios analisado, pode-se afirmar que o p -value foi menor que 0,05 para todos os resultados das comparações, a associação entre as estimativas foi considerada estatisticamente significativa, com um nível de confiança de 95%. Isso indica que as estimativas são fortemente correlacionadas e possuem a mesma tendência, movendo-se em perfeita proporção na mesma direção, quanto à expansão e/ou diminuição das áreas da cultura no estado.

4. Conclusões

A técnica da análise harmônica aplicada à série de composições MVC/NDVI obtidas das imagens AVHRR/NOAA-17 permitiu a obtenção de informações sobre a cana-de-açúcar, possibilitando a sua identificação, validando uma das hipóteses deste trabalho. Há uma forte evidência que o número de imagens na série está diretamente relacionado à melhoria dos resultados obtidos na avaliação da área. Na safra 07/08 os erros relativos entre as estimativas (CANASAT x Matriz de erro) foram inferiores a 10%, para os municípios estudados.

Referências Bibliográficas

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

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

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

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

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.

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

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

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

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