

Identificação da dinâmica do uso e cobertura da terra: expansão da cultura da cana-de-açúcar

Juliana Silveira dos Santos¹
Daniel Alves de Aguiar¹
Marcos Adami¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{julianas, daniel, adami, bernardo}@dsr.inpe.br

Abstract. Sugarcane crop has rapidly expanded during the last years in the South-Center region of Brazil causing a significant land use and land cover change. The objective of this work was to identify and quantify land use and land cover change patterns in response to sugarcane expansion in the states of Mato Grosso and Mato Grosso do Sul located in the South-Center region of Brazil. Filtered time series of MODIS/EVI2 data from 2000 to 2010 for sugarcane fields expanded from 2005 to 2010 were used to evaluate the land use and land cover change. Landsat-5 TM images were used to identify 38 patterns of different land conversion to sugarcane that could be identified in the MODIS/EVI2 time series. The two major patterns were: pasture-sugarcane (45.2%); and pasture-agriculture (three years)-sugarcane (17.6%). The analyses of MODIS/EVI2 time series showed to be extremely useful to identify and quantify a large number of land use and land cover change patterns due to sugarcane expansion.

Palavras-chave: phenology, time series, wavelets, land use and land cover change, fenologia, séries temporais, wavelets, mudança de uso e cobertura da terra.

1. Introdução

O cultivo da cana-de-açúcar tem crescido expressivamente nos últimos anos devido à elevada demanda interna por etanol e externa por açúcar. Desta forma, cenários futuros de produção e consumo de energia apontam os biocombustíveis, em especial o etanol da cana-de-açúcar, como uma alternativa válida aos combustíveis fósseis não renováveis (Leite et al., 2009; Goldemberg et al., 2008). Essa expansão na área cultivada da cana-de-açúcar tem causado a modificação na paisagem em escala regional, resultando em mudanças no uso e na cobertura da terra e na criação de padrões de conversão de outras coberturas para a cultura da cana-de-açúcar. Buscando direcionar a expansão desse cultivo o Governo Federal lançou em 2009 o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar, no qual são indicadas as áreas de melhor aptidão agrícola de acordo com as condições edafoclimáticas e de uso da terra. Em adição, as propostas de certificação ambiental do etanol prevêem que o cultivo da cana-de-açúcar não substitua áreas de vegetação nativa e de alta biodiversidade (Smeets et al., 2008 e Embrapa, 2009).

Nesse contexto, o monitoramento da expansão da cana-de-açúcar torna-se fundamental e as imagens de sensoriamento remoto, como os produtos disponibilizados a partir do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo das plataformas Terra e Aqua, apresentam potencial para este tipo de análise já que têm resoluções espacial, espectral e temporal compatíveis com o tamanho das lavouras e capaz de identificar as alterações no desenvolvimento fenológico da vegetação.

Diversas pesquisas vêm demonstrando o potencial dessas imagens quando utilizadas para caracterizar padrões de cultivos e áreas de expansão agrícola (Galford et al., 2008). De acordo com Sakamoto et al. (2005) séries temporais derivadas dos produtos MODIS são eficientes ferramentas para identificar processos de conversão do uso e cobertura da terra. A avaliação da mudança de uso e cobertura da terra em decorrência da expansão do cultivo da

cana-de-açúcar foi realizada por Nassar et al. (2008); Rudorff et al. (2009) e Rudorff et al. (2010). Nesses trabalhos foram definidos alguns padrões de mudança de uso e cobertura da terra com base na interpretação de imagens TM/Landsat para toda a região Centro-sul e em séries temporais de imagens MODIS para o noroeste do Estado do Paraná. A fim de ampliar a avaliação da mudança de uso e cobertura da terra com séries temporais MODIS, o objetivo deste trabalho foi identificar os padrões do uso e cobertura da terra que vêm sendo convertidos em cana-de-açúcar nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

2. Metodologia de trabalho

A área de estudo correspondeu a dois estados da região Centro-sul do Brasil, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, caracterizados pelas crescentes áreas de expansão da cultura da cana-de-açúcar e a instalação de usinas sucroalcooleiras (Figura 1).

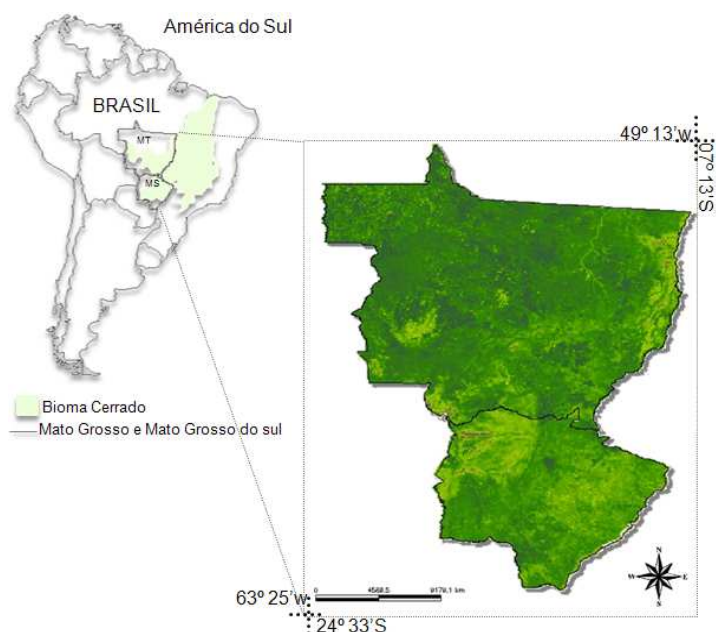


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.

Para o trabalho foram utilizadas séries temporais de imagens do produto *Enhanced Vegetation Index 2* (EVI2), geradas a partir dos dados do sensor MODIS, que tem como características uma maior sensibilidade a áreas de alta densidade de biomassa, além da capacidade de minimizar as influências da atmosfera e do solo quando comparado a outros índices de vegetação (Equação 2).

$$EVI2 = G \frac{N - R}{N + \left(6 - 7, \frac{5}{c}\right) R + 1} \quad (1)$$

em que G representa o fator de ganho (2,5), N e R são, respectivamente, a reflectância de superfície nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho e c é o coeficiente de ajuste entre as bandas do vermelho e do azul (banda azul = banda vermelho/c).

A principal diferença entre os índices EVI e EVI2 esta baseada na relação empírica de que as bandas da região do visível são altamente correlacionadas, o que permite ao EVI2 estimar a refletância do azul e assim depender apenas da informação proveniente das bandas do infravermelho e do vermelho, tornando possível a utilização de um número maior de sensores para o cálculo dos índices de vegetação, que antes ficava restrito a dados da banda do

azul e favorecendo uma melhor comparação dos valores obtidos por diferentes plataformas que tem muita diferença devido aos diversos processos de correção atmosférica e influência de nuvens (Jiang et al., 2008 e Fensholt et al., 2006).

A elaboração da série temporal consistiu em um conjunto de imagens referentes ao período de 2000 a 2009 que foram reprocessadas de acordo com os critérios de Sakamoto et al., 2005. Desta forma, os *pixels* com reflectância maior que 10% na banda do azul ou com ângulo de visada superior a 32,5° foram eliminados. Estes processamentos serviram para minimizar os possíveis efeitos devido à presença de nuvens espessas além dos efeitos de *pixels* vizinhos quando o sensor observa um local com maiores ângulos de visada que pode aumentar muito a área do *pixel*. Uma característica das séries temporais obtidas por sensores remotos é que estas possuem ruídos intrínsecos em função da influência da atmosfera e do sensor. Estes ruídos dificultam a interpretação dos resultados da série tornando difícil a identificação dos padrões do uso e de cobertura da terra. Por este motivo, os dados de EVI2 também passaram por um processo de filtragem utilizando *wavelets*.

Uma transformada de *wavelet* é responsável pela decomposição da série temporal em diferentes domínios de frequência. Se uma função $f(t)$, definida no tempo, passa por uma transformada de *wavelet*, matematicamente temos:

$$w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

em que, a é o parâmetro de escala ou dilatação, b é o parâmetro de translação, Ψ é a *wavelet* mãe e $*$ indica o conjugado complexo. No caso deste trabalho a Ψ utilizada para a reconstrução da série temporal de EVI2 foi a *wavelet* de *Daubechies* 8. Assim, foram eliminados os domínios das altas frequência que caracterizam os ruídos enquanto que as feições principais do dado original foram preservadas, realçando o comportamento sazonal da série temporal e facilitando a sua interpretação (Figura 2).

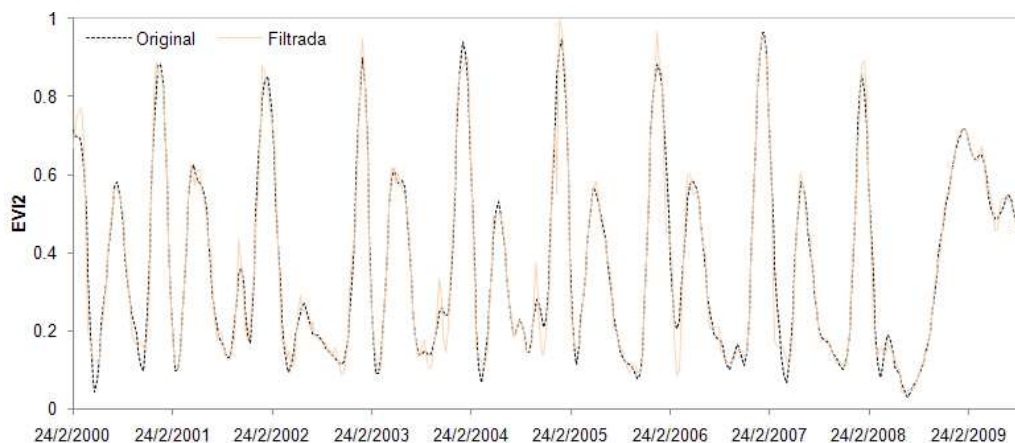


Figura 2. Dados MODIS antes (linha tracejada) e depois da filtragem (linha cheia).

Para identificar apenas o padrão de conversão da cultura da cana-de-açúcar foi utilizado o mapeamento do projeto CANASAT (<http://www.dsr.inpe.br/canasat>) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) que disponibiliza a área cultivada, área disponível para colheita e as áreas de expansão da cultura da cana. A partir destes mapas temáticos foram selecionados apenas os polígonos identificados como áreas de expansão de cana-de-açúcar dos anos de 2005 a 2010 (Rudorff et al., 2010).

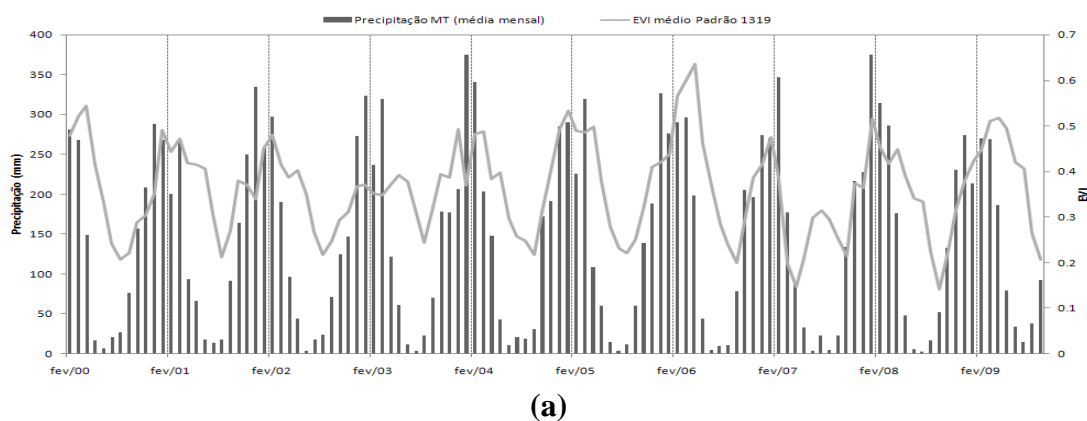
Na sequência, os polígonos de expansão foram convertidos para uma grade regular com dimensão de 250x250 m, visando a integração com os dados MODIS. Esta grade regular foi

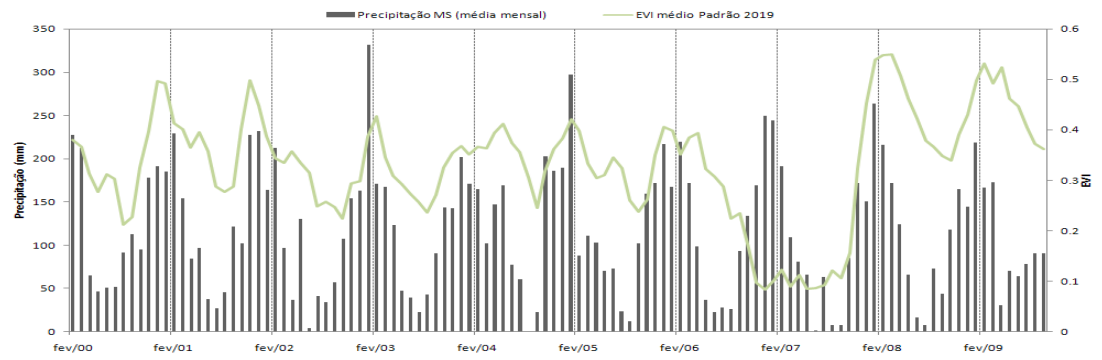
amostrada sistematicamente, com uma taxa de amostragem de 1%. Para cada elemento amostrado foi obtida uma série temporal de EVI2 e também de imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat-5 disponíveis para a região de estudo (2000/2010). Desta forma, os elementos amostrados, a série temporal e as imagens utilizadas foram integrados em um banco de dados (<http://www.dsr.inpe.br/laf/curvas>), que permitiu identificar, apenas nas áreas de certeza de expansão de cana-de-açúcar, qual foi o uso/cobertura anterior ao cultivo. Cada ano safra do período 2000-2009 foi classificado nas classes: agrícola (Ag), cana-de-açúcar (Ca), dúvida (Du), pastagem (Pa) e vegetação arbórea (Va) de acordo com a característica de cada série temporal e com bases nas imagens do sensor TM. O número de *pixels*/pontos analisados dentro dos polígonos de expansão totalizou 199 pontos, sendo que a maioria dos polígonos de expansão de cana foi identificada em áreas do estado do Mato Grosso do Sul.

Buscando uma maior exatidão na classificação da série temporal foram utilizados dados de precipitação para auxiliar na interpretação das imagens do sensor TM e da série temporal, já que muitas vezes as mudanças nas séries temporais são mascaradas pelos efeitos da sazonalidade e das variações da temperatura e precipitação (Verbesselt et al., 2010). Os dados de precipitação foram adquiridos gratuitamente a partir do produto 3B43 do satélite *Tropical Rainforest Measuring Mission* (TRMM) que foram inseridos no aplicativo *Grid Analysis and Display System* (GRADS) e, posteriormente, foi extraída a média espacial da precipitação média mensal do retângulo envolvente de cada estado durante os anos de 2000 a 2009.

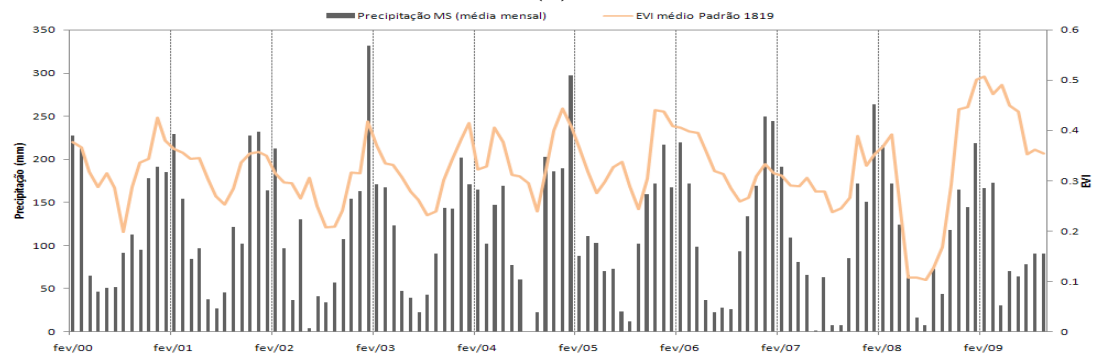
3. Resultados e Discussões

Foram identificados 38 diferentes padrões de expansão da cultura da cana-de-açúcar; no entanto, para uma melhor interpretação dos dados estes padrões foram agrupados de acordo com a maior ocorrência na região de estudo. Nas Figuras 3a, b, c, d, e e f são apresentados os principais padrões de expansão da cana-de-açúcar e os dados da precipitação média mensal para todos os anos observados.

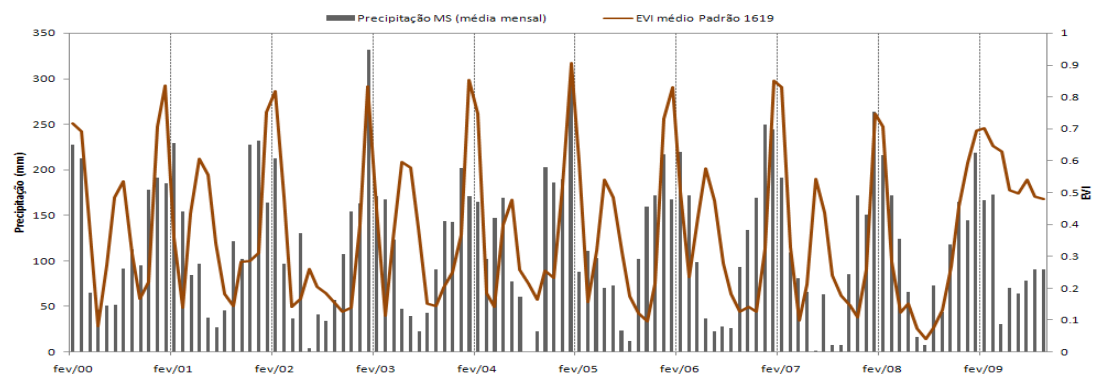




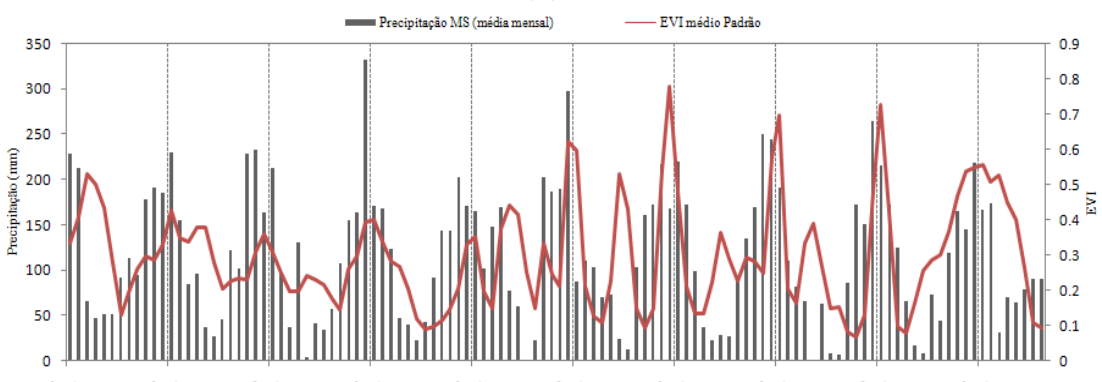
(b)



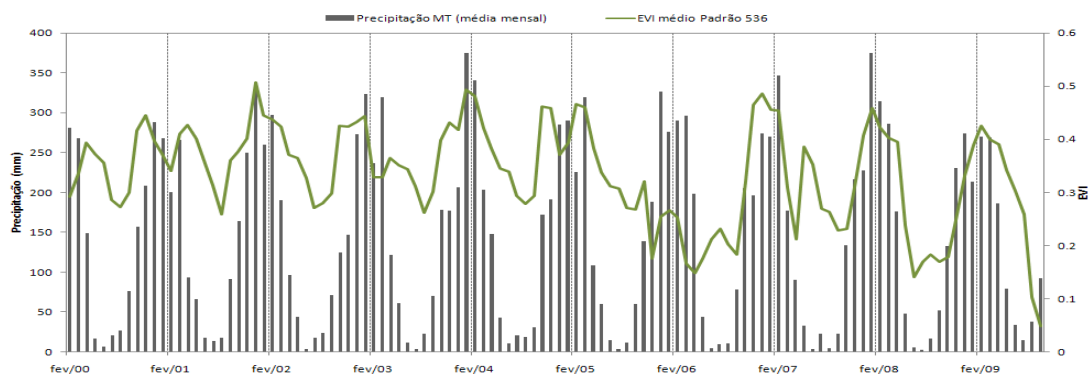
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3. Exemplos de séries temporais MODIS/EVI apresentando as principais cronosssequências de uso da terra antes da entrada da cana: (a) Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Du-Ca-Ca; (b) Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Du-Ca-Ca-Ca; (c) Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Pa-Ca-Ca; (d) Ag-Ag-Ag-Ag-Ag-Ag-Ag-Ca-Ca; (e) Va-Va-Va-Du-Ag-Ag-Ag-Ca-Ca; (f) Pa-Pa-Pa-Pa-Ag-Ag-Ag-Ag-Ca-Ca. As barras representam a precipitação.

No período 2008/2009 todas as áreas observadas foram caracterizadas como áreas de expansão de cana-de-açúcar que têm um padrão de variação temporal bem característico com valores de amplitude, máximo e mínimo de EVI bem definidos e distintos de outras culturas agrícolas como, por exemplo, a soja que é caracterizada por EVI superiores a 0,7 no período de máximo desenvolvimento vegetativo.

A maioria das áreas de expansão de cana nos estados do MT e MS foi anteriormente identificada como pastagem. No entanto, o que diferencia o padrão de expansão pastagem-cana é o tempo que a cultura da cana leva para ocupar as áreas de pastagem. A partir do ano-safra 2004/2005 as áreas de cana já começaram a ocupar as áreas de pastagem, porém, a intensificação da substituição de pastagem para cana-de-açúcar ocorreu a partir do período 2006/2007. Desta forma, na maioria das vezes as pastagens foram substituídas pela cana a partir do 6º e 7º ano da análise temporal dos dados deste trabalho, o que representou **40,2%** do padrão da expansão nos estados do MT e MS (Figuras 3a e b). Foi observado também um período de transição de pastagem para cana que foi denominado de “classe dúvida” quando ocorre o preparo do solo por um período mais longo, antes da entrada da cana, ou então, não é possível identificar o uso da terra antes do plantio da cana (Figura 3c) por questões, provavelmente, ligadas ao manejo. Esta classe dúvida representou **5%** da conversão pastagem-cana. Somando as duas conversões anteriores obteve-se um total de conversão pastagem-cana de **45,2%** (Tabela 1).

Foram identificados padrões em que a pastagem não é substituída diretamente pela cultura da cana. Nestes casos o cultivo da cana-de-açúcar entrou em áreas de outras culturas não identificadas neste trabalho (Figura 3f). Esta substituição pastagem-agrícola-cana foi estabelecida a partir do período 2002/2003, sendo que a intensificação da conversão pastagem-agrícola-cana que representa **17,6%** do padrão de expansão foi observada no mesmo período caracterizado como máximo de conversão pastagem-cana (2006 a 2008). Esta característica pode ser atribuída a um manejo adotado antecedente ao cultivo da cana (melhoria do solo), no entanto em alguns casos os cultivos agrícolas antecedentes ao plantio da cana permanecem cultivados no mínimo durante 3 anos o que caracteriza a conversão de outras culturas agrícolas para cana-de-açúcar (**12,6%**). As áreas que foram culturas agrícolas desde o ano 2000 e foram convertidas em cana-de-açúcar representam **10,5%** dos pontos classificados (Figura 3d), sendo que geralmente esta conversão ocorreu no ano agrícola 2006/2007, período que coincide com a intensificação da conversão pastagem-cana.

Na Figura 3e, pode-se observar que algumas áreas de cana-de-açúcar foram expandidas em áreas que, primeiramente, foram identificadas como vegetação arbórea (cerrado) e que na sequência foram substituídas por áreas de pastagem ou de culturas agrícolas. Embora este padrão de expansão tenha uma baixa representatividade (1,5%; Tabela 1) é importante ressaltar que em algumas áreas a pastagem ou o cultivo agrícola permaneceram apenas durante um ano, evidenciando que apenas um manejo antecedente ao cultivo da cana foi adotado nas áreas de vegetação natural.

Tabela 1. Os quatro padrões de expansão de cana-de-açúcar mais expressivos nos estados do MT e MS.

Padrão de expansão	Representatividade (%)
Pastagem - cana-de-açúcar	45,2
Pastagem - agrícolas - cana-de-açúcar	17,6
Agrícolas - cana-de-açúcar	10,5
Vegetação arbórea - agrícolas/pastagem - cana-de-açúcar	1,5

A partir dos parâmetros extraídos das curvas foi possível diferenciar os valores de EVI2 de máximo, mínimo, amplitude e área da curva para cada classe de uso e cobertura da terra classificada como cana-de-açúcar e expansão. As áreas de cana-de-açúcar, pastagem e vegetação natural apresentam perfil temporal semelhante. No entanto, as áreas de cana-de-açúcar se diferenciam pelos valores máximos de EVI2, superiores aos destas áreas devido à maior biomassa sobre o solo no período de máximo desenvolvimento vegetativo característico de cultura agrícola. As áreas de vegetação natural (cerrado) têm valores máximos de EVI2 que raramente excedem a 0,5 o que caracteriza a baixa variação fenológica desta vegetação. Os valores de área da curva e amplitude diferenciam as áreas de cana-de-açúcar (17,12 e 0,42) das demais culturas agrícolas presentes na região com área da curva de 13,99 e amplitude de 0,76 características que podem ser atribuídas ao ciclo semi-perene da cultura. As áreas de pastagem têm um padrão temporal semelhante ao das áreas de vegetação natural com valores máximos de EVI2 de 0,46; no entanto, apresentam valores altos de EVI bem definidos dependendo da estação do ano.

4. Conclusões

O sensoriamento remoto atua como uma fonte importante para prover dados para o monitoramento dos recursos terrestre e dos ecossistemas, permitindo, portanto, a identificação e a caracterização das mudanças do uso e cobertura da terra e consequentemente seus impactos diretos e indiretos no ambiente. As séries temporais derivadas de imagens de moderada resolução espacial permitiram identificar que o cultivo da cana-de-açúcar tem se expandido em áreas de pastagem e de culturas agrícolas e que a intensificação deste uso tem ocorrido principalmente nos últimos 4 anos, padrão de expansão também descrito por trabalhos que analisaram as áreas de expansão de cana-de-açúcar em outros Estados da região Centro-sul do Brasil.

No Estado do MT foram identificadas algumas áreas agrícolas, que apresentavam padrão de duplo cultivo antes da conversão agrícola-cana-de-açúcar característica que já pode ter relação com a dinâmica de nutrientes e dos fluxos biogeoquímicos. Não foi identificado nenhum padrão de conversão direto de vegetação natural (cerrado) para cana-de-açúcar. Estas áreas são primeiramente convertidas em pastagem ou/outra cultura agrícola, o que ressalta que padrões como estes não podem ser identificados a partir de séries temporais curtas o que evidencia a importância da utilização de séries temporais longas quando se busca investigar a relação entre áreas dinâmicas como as agrícolas e de áreas de vegetação natural.

Dados complementares como imagens de satélite com uma resolução espacial mais fina de precipitação e temperatura são importantes ferramentas de auxílio na interpretação das séries temporais, já que esses parâmetros podem originar erros na interpretação.

Referências Bibliográficas

- Adami, M.; Freitas, R. M.; Padovani, C. R.; Shimabukuro, Y. E.; Moreira, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (Online), v. 43, n. 10, p. 1371-1378, 2008.
- Aguiar, D. A.; Silva, W. F.; Rudorff, B. F. T.; Sugawara, L. M.; Carvalho, M. A. Expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: safras 2003/2004 a 2008/2009. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 9-16.
- Canasat – Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat>> Acesso em: 29 de julho de 2010.
- Fensholt, R.; Sandholt, I.; Stisen, S. Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION indices using in situ measurements in a semiarid environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1774–1786.
- Goldemberg, J.; Coelho, S.T. ; Guardabassi, P. “The sustainability of ethanol production from sugarcane”. *Energy Policy*. vol. 36, pp. 2086–2097, 2008.
- Jiang, Z.; Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* n. 112, p. 3833-3845, 2008
- Nassar, A.M., Rudorff, B.F.T., Antoniazzi, L.B., Aguiar, D.A., Bacchi, M.R.P., Adami, M., “Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes”. In: Zuurbier, P., Vooren, J.V. (Org.). *Sugarcaneethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp. 63-93, 2008.
- Rudorff, B. F. T.; Adami, M.; Aguiar, D. A.; Gusso, A.; Silva, W. F.; Freitas, R. M. Temporal Series of EVI/MODIS to Identify Land Converted to Sugarcane. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2009)*.
- Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D. A.; Silva, W. F.; Sugawara, L. M.; Adami, M.; Moreira, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. *Remote Sensing*, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010. doi: <10.3390/rs2041057>.
- Sakamoto, T.; Yokozawa, M.; Toritani, H.; Shibayama, M.; Ishitsuka, N.; Ohno, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment* n. 96, p. 366-374, 2005
- Silva, W. F.; Aguiar, D. A.; Rudorff, B. F. T.; Sugawara, L. M.; Aulicino, T. L. I. N. Análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 467-47.
- Verbesselt, J.; Hyndman, R. ; Zeileis, A.; Culvenor, D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, v. 2, n. 4, p. 2970-2980, 2010.