

Detecção temporal semiautomática de desmatamento na Floresta Ombrófila Mista via sensoriamento remoto

Henrique Luis Godinho Cassol ¹ Elisabete Caria Moraes ¹ Yosio Edemir Shimabukuro ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR
Avenida dos Astronautas, 1.758 - Jd. Granja CEP 12227-010
henrique@dsr.inpe.br; bete@ltd.inpe.br; yosio@dsr.inpe.br

Abstract. In this work, we discuss the use of principal component analysis (PCA) and Asymmetric Fragmentation Operator (AFO) for evaluating the deforestation in Araucaria Forest. Thus, we asked: is it possible to detect forest loss basing on anomalies of temporal spectrum from forest? To answer this question were utilized two changed detection analyses, PCA and AFO, on two singular pixels with deforestation behavior time-series EVI with 16 days composition derived from MODIS. The results showed that PCA separated deforestation dates of forest time series mainly on two principal components. These principal components could be used to detecting the date of forest loss in a semi-automated approach. Semi-automated because is necessary a forest class masking before analysis. The AFO do not adequately separated deforestation from temporal spectrum of forest, however, data transformation could improve its analysis and the change detection.

Key-words: Deforestation, Araucaria Forest, temporal spectrum, AFA, PCA, time-series;

1. Introdução

A Floresta Ombrófila Mista é uma das sete fitofisionomias da Floresta Atlântica. Pesquisas recentes demonstram haver um alto grau de fragmentação e de suscetibilidade ecológica desta formação florestal (RIBEIRO et al. 2009) e, assim como ocorreu em toda a Floresta Atlântica em geral, deveu-se ao histórico uso e ocupação do solo para as atividades agrícolas, extrativistas, pecuária extensiva, e, recentemente, silvicultura (HIGUCHI et al. 2012; BEHLING e PILLAR, 2007).

Apesar dos esforços para a criação de corredores ecológicos e para a caracterização atual dos fragmentos da Floresta com o objetivo de definir planos de conservação (MEDEIROS et al. 2005; PRBIO, 2009), as estimativas do remanescentes da FOM situam-se entre 10 – 20 % (GALINDO LEAL; CÂMARA, 2003; IESB et al. 2007; RIBEIRO et al. 2009).

Segundo Ferraz et al. (2005), as primeiras consequências ecológicas do desmatamento são o declínio da biodiversidade, a invasão de espécies exóticas e o aumento de escoamento superficial. As variações de extensão e de fragmentação do ecossistema são fatores importantes para avaliar o estado da biodiversidade no que se refere à paisagem. Segundo Lasaponara (2006), a caracterização da cobertura florestal e a sua dinâmica temporal (desmatamento e incremento) pode ser abordada de forma eficiente usando dados oriundos de sensoriamento remoto, porque fornecem ampla cobertura espacial e temporal, bem como, formam um conjunto de dados consistentes e confiáveis.

A dificuldade de detectar o desmatamento está justamente no aspecto dinâmico de transformação da cobertura florestal. O espectro temporal pode ser uma alternativa viável, pois conserva as referências espaciais (localização geográfica) e adiciona o aspecto dinâmico (temporal) de uma superfície florestada. Assim, a análise do espectro temporal nos traz importantes informações sobre o comportamento das formações florestais ao longo do tempo e do espaço, sendo uma poderosa ferramenta para estudos relacionados à sazonalidade e às mudanças – neste caso, associada ao desmatamento.

Segundo Huete et al. (2002), a alta resolução temporal dos produtos do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo das plataformas Terra e Aqua, tem sido muito útil para o monitoramento da vegetação, especialmente para caracterizar padrões temporais e espaciais da atividade fotossintética, incluindo seus aspectos fenológicos e suas mudanças. Dentre os produtos destacam-se os dados de reflectância de superfície (MOD09) e

os índices de vegetação, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Ambos os índices, NDVI e EVI, foram formulados para realçar as feições com alta atividade fotossintética, uma vez que estão fortemente relacionados à densidade de vegetação presente e ao índice de área foliar.

Assim, quando ocorre o desmatamento de uma superfície florestal o resultado será uma queda acentuada nos valores dos índices de vegetação. Esta modificação, por exemplo, poderia ser detectada pela variação anômala do comportamento temporal da floresta por meio da Análise de Componentes Principais (ACP), que separa as componentes com base na maior variabilidade do conjunto de dados (RICHARDS e JIA, 2006) ou mesmo pela Análise de Fragmentador Assimétrico (AFA) que é uma solução sumária para a análise de padrões de gradientes (ROSA et al. 1998). Neste sentido pretende-se avaliar se: É possível detectar o desmatamento baseando-se apenas nas variações do comportamento temporal da Floresta Ombrófila Mista?

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo envolve a mesorregião do Sudeste do Paraná, pertencentes à Floresta Ombrófila Mista (FOM) (Figura 1). Segundo Maack (1950) citado por IPARDES (2004), a cobertura vegetal desta mesorregião era de 78% de Floresta Ombrófila Mista, sendo 63% original, 20% de Floresta Estacional Semidecidual e 2% de Campos Naturais.

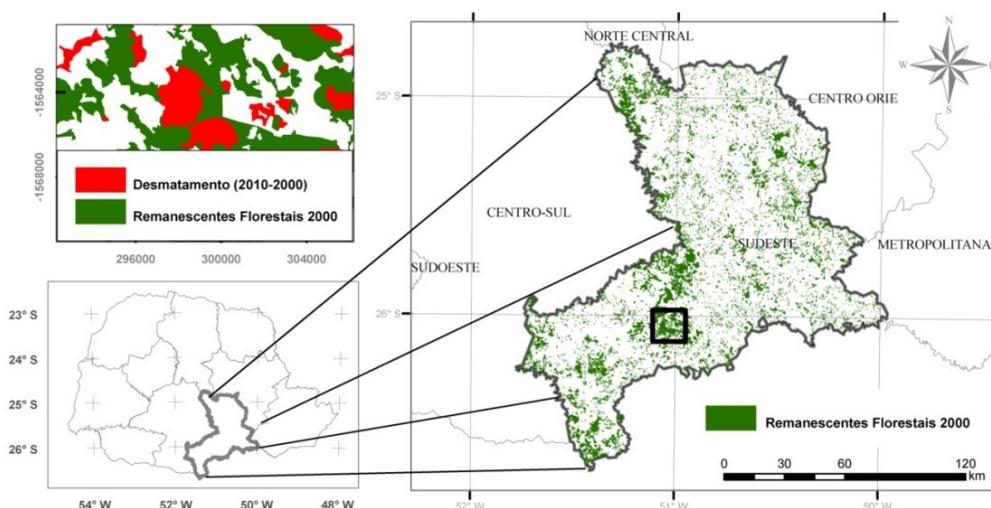


Figura 1. Localização espacial do Sudeste paranaense. No detalhe do canto superior esquerdo, os remanescentes florestais e os polígonos do desmatamento acumulado entre 2000 e 2010.

2.2. Desmatamentos acumulados

Os polígonos contendo os remanescentes florestais dos anos 2000 e 2010 foram produzidos pelo SOS Mata Atlântica/INPE (2010). Os *shapefiles* dos remanescentes de floresta de 2000 e 2010 foram baixados do site do SOS Mata Atlântica/INPE (www.sosma.org.br).

Para selecionar os pixels das áreas que apresentaram desmatamento, foi realizada a diferença entre a área de remanescentes de florestas naturais nos anos de 2000 e 2010 (Fig.1). Este *shapefile* foi exportado para ser visualizado no site de séries temporais do EVI2 derivadas do sensor MODIS, desenvolvido pelo Laboratório de Agricultura e Floresta (LAF) do INPE (FREITAS et al. 2011) e dois *pixels* mais representativos do desmatamento foram baixados (Figura 2).

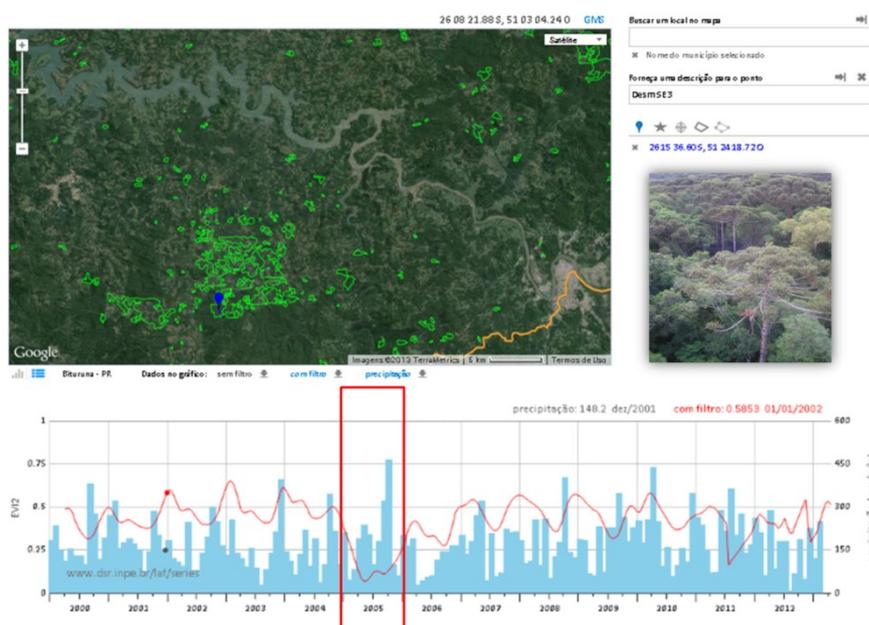


Figura 2. A série temporal do EVI2, LAF/INPE, demonstra o padrão típico de desmatamento (retângulo em vermelho) onde ocorreu uma diminuição expressiva no valor do índice de vegetação, devido à perda de floresta.

2.3. Dados MODIS

Os dados utilizados são referentes ao índice EVI do sensor MODIS, sem aplicação de filtro, disponibilizados pelo LAF do INPE (www.dsr.inpe.br/laf/series). A série temporal corresponde ao produto EVI composição de 16 dias, em formato .hdf, de 2000 a 2009, totalizando 227 bandas. O produto de imagens está em coordenadas geodésicas Lat/Long, datum WGS-84 (FREITAS et al. 2011).

O primeiro procedimento foi colocar todas as imagens em um conjunto unitário conhecido como cubo 3D, formado pela composição de todas as 227 bandas, em que o índice EVI2 de 16 dias corresponde ao valor do atributo z da imagem (Figura 3).

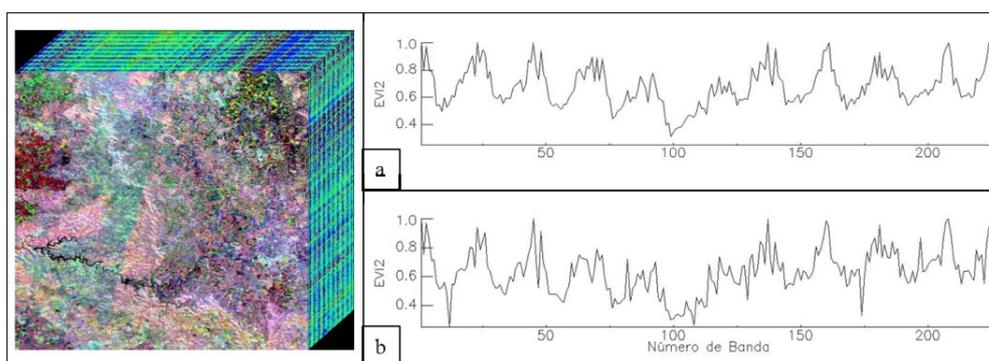


Figura 3. Cubo 3D formado pelo conjunto das 227 bandas EVI2 MODIS a cada 16 dias (esquerda). a) Espectro temporal com filtro MNF; e b) Espectro temporal sem filtro.

Em seguida foi realizada uma filtragem pela técnica conhecida como *Minimum Noise Fraction* (MNF), semelhante à análise de componentes principais para redução da dimensionalidade, mas com a diferença de ordenar as componentes segundo a otimização da relação de sinal/ruído (GREEN et al. 1988). O resultado da filtragem encontra-se na Figura 3a. Após, aplicou-se a máscara do desmatamento, construída a partir dos remanescentes florestais de 2000 e de 2010, em toda a série e, extraídas as componentes principais.

2.4. Metodologia

A metodologia foi subdividida em duas etapas. Na primeira etapa, testaram-se as técnicas de ACP e AFA para detectar o perfil temporal de desmatamento em dois *pixels* singulares. Na segunda etapa, apenas a ACP foi empregada em toda a série da temporal EVI2/MODIS. Detalhes destas análises serão descritos a seguir.

2.4.1. Análise de Componentes Principais (ACP)

A análise de componentes principais é uma transformação linear que descorrelaciona os dados multivariados das imagens do espaço de coordenadas originais, pela rotação ou translação de seu eixo, em um espaço de atributos, de forma que as componentes principais são ordenadas segundo a ausência de correlação espacial no novo espaço de coordenadas (RICHARDS e JIA, 2006). A ACP derivada da composição temporal de NDVI foi testada por alguns autores como sendo uma técnica confiável para detectar as variações que afetam a cobertura vegetal (CUOMO et al. 2001; LANFREDI et al. 2003). Estes autores verificaram que a técnica foi capaz de mostrar as variações interanuais em decorrência de eventos climáticos extremos e os danos antropogênicos induzidos nos ecossistemas vegetados.

Nesta investigação, a ACP foi empregada na série temporal com o intuito de separar as datas associadas à mudança. O resultado sumário desta análise é de que a alta correlação entre as imagens dentro da série não são associadas à mudança, enquanto a sua baixa correlação estaria significativamente relacionada às regiões que apresentaram forte mudança no espectro temporal (LASAPONARA, 2006).

Sendo assim, os *pixels* com as anomalias da variância do espectro temporal da floresta, associadas ao desmatamento, poderiam ser separados dos demais *pixels* não anômalos por meio da seleção de membros puros (*endmembers*) localizados nas primeiras componentes principais, que representam a maior porcentagem de variabilidade da imagem. Esta análise foi primeiramente desenvolvida para detectar o desmatamento nos *pixels* singulares e depois testada em toda a série MODIS.

2.4.2. Análise de Fragmentador Assimétrico (AFA)

A análise de fragmentador assimétrico foi uma técnica desenvolvida para solucionar a análise de padrão de gradiente em séries temporais não estacionárias (ASSIREU et al. 2004). Consiste em representar a assimetria de forma para um conjunto de vetores compostos por 9 *pixels*, com o objetivo de detectar mudanças/anomalias no padrão da série temporal (ROSA et al. 1998). O pressuposto do AFA é a de que “a complexidade de um padrão espacial pode ser caracterizada pela sua falta de simetria e pelo seu grau de fragmentação” (ASSIREU et al. 2004). Na análise, padrões simétricos apresentam valores de complexidade próximos à zero, e aumentam sucessivamente com o aumento da assimetria e da complexidade de forma.

A AFA desenvolvida consiste em atribuir um valor, associado a vetores, a partir do conjunto de matrizes numéricas formadas por 3x3 *pixels* (Figura 4). Por convenção, o cálculo do operador considera apenas os vetores assimétricos para o cálculo da assimetria. Os vetores assimétricos são inseridos em um campo de gradiente, cujos centros são utilizados como critério para a conexão pela triangulação de Delaunay. Assim, é possível separar matrizes com iguais valores de vetores de campo de gradientes (V) e de vetores assimétricos (L). O número de arestas (I), utilizado para unir os centros de cada vetor, é diferente em ambos os casos (Figura 4a e 4b). O valor de I confere-nos sobre a complexidade de forma ou de desordem espacial do campo de gradiente. A fórmula utilizada para representar a assimetria é dada por (Eq. 1):

$$Fa = (I-L)/L \quad (I \geq L > 0) \quad (1)$$

Conforme Assireu et al. (2002), um conjunto de nove pontos de uma série temporal (Fig. 4c) é convertido em um matriz 3x3 (Fig. 4d) e os campos de gradiente e de triangulação de Delaunay são gerados na AFA (Fig. 4e e 4f, respectivamente). Dessa forma, a anomalia da série temporal, associada ao desmatamento, pode ser refletida no aumento ou na diminuição da complexidade de forma da AFA.

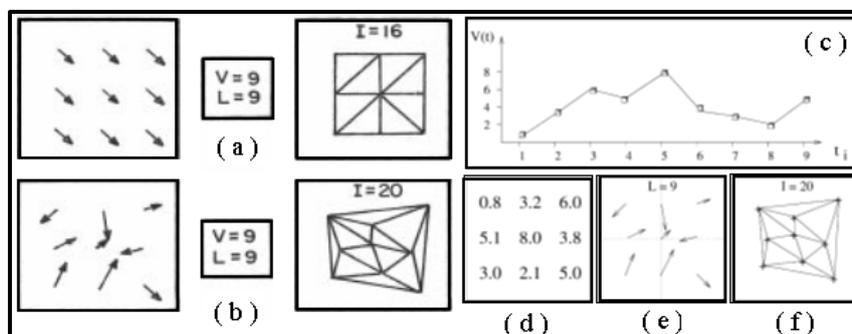


Figura 4. Campo de triangulação das matrizes para o mesmo número de vetores assimétricos a) e b). Padrão de variabilidade de uma série unidimensional hipotética c); Matriz de valores correspondentes d); campo de gradientes vectoriais e); triangulação de Delaunay dos nove vetores assimétricos, com 20 arestas f). Fonte: Assireu et al. (2002).

3. Resultados

3.1. ACP unidimensional

Na Figura 5, tem-se o resultado da ACP (Fig 5a) sobre os dois *pixels* representativos do desmatamento (Fig. 5b e 5c). Verifica-se, pela Figura 5a, que a ACP separou bem os *pixels* contendo as datas de desmatamento. As datas correspondentes ao desmatamento do primeiro *pixel* (Fig 5b) puderam ser separadas das demais por conter altos valores positivos nas CP-2 e altos valores negativos na CP-1 (Fig. 5a), ao passo que as datas correspondentes ao desmatamento do segundo *pixel* foram separadas por conter altos valores negativos em ambos os escores das componentes principais. O problema é que muitas vezes a extração de componentes podem não ter nenhum significado físico. Por isso, para se interpretar corretamente o resultado obtido da ACP são necessárias informações complementares como dados de campo e dados adicionais sobre o fenômeno (LASAPONARA, 2006).

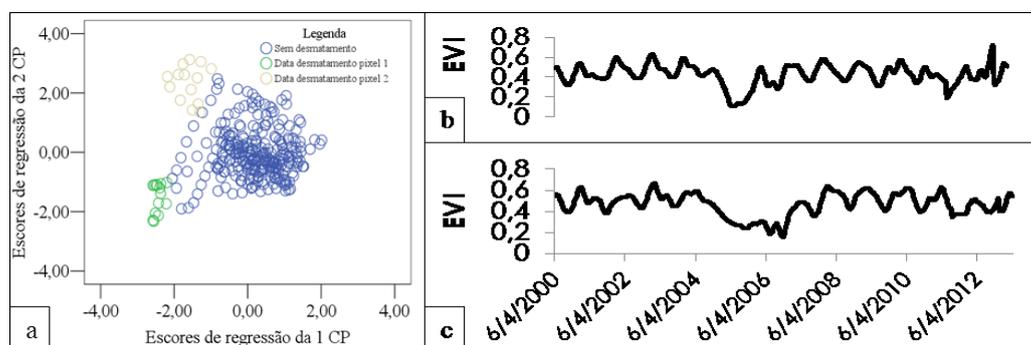


Figura 5. Resultado da ACP em dois *pixels* de desmatamento. Dispersograma das duas componentes principais sobre a série temporal. Nota-se a separação dos anos com desmatamento nas duas componentes a); *Pixels* utilizados na análise, com desmatamento próximo ao ano 2005 b); e próximo ao ano 2006.

3.2. AFA

Na Figura 6, tem-se o resultado da AFA para os dois *pixels* típicos de desmatamento. Nota-se que a técnica empregada para detectar a mudança nos valores de EVI não apresentou bom resultado, uma vez que não separaram de forma clara as mudanças mais abruptas no

espectro temporal da floresta, que estariam associadas ao desmatamento. Isto pode ser constatado pela anomalia de desmatamento não estar associada a nenhum padrão ou anomalia no índice de fragmentação assimétrica (Fa).

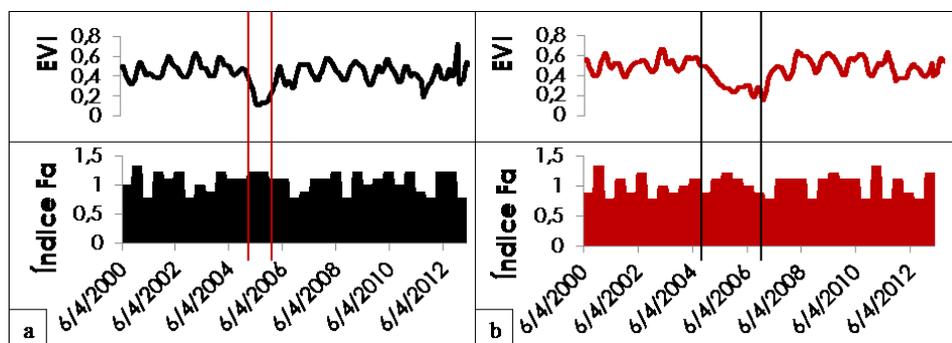


Figura 6. Resultado da AFA para os dois pixels de desmatamento. Em destaque, as datas com as respectivas anomalias no espectro temporal de EVI, associadas ao desmatamento no período.

3.3. ACP bidimensional

Segundo a análise, mais de 99% da variância de toda a série EVI/MODIS (não demonstrado), por isso, interessam-nos apenas as duas primeiras componentes para a detecção semiautomática dos pixels de desmatamento na série (Figura 8). Assim como ocorreu no exemplo unidimensional, os pixels puros de desmatamento são representados por conterem altos valores na CP1 e CP2 (Fig. 8a). Na Figura 8b, estes pixels puros aparecem em verde claro e com pontos vermelhos representando-os, na composição colorida RGB: PC1-PC2-PC3 e em cor lilás na composição com as bandas RGB: 23/10/2004-01/05/2005-17/12/2006.

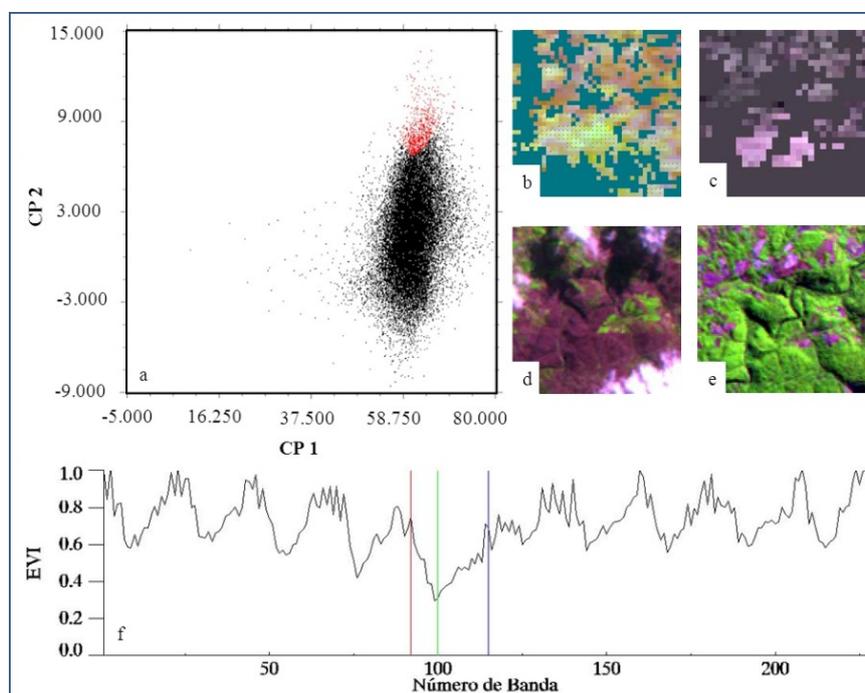


Figura 8. ACP para a série temporal EVI MODIS. a) Dispersograma dos *pixels* com as duas componentes principais em toda a cena de 227 bandas da série. Em vermelho, estão destacados os *pixels* puros, representados pelo desmatamento. b) *pixels* puros de desmatamento (pontos vermelhos) composição colorida RGB: CP1-CP2-CP3 do sensor MODIS. c) composição colorida da área de desmatamento RGB: 23/10/2004-01/05/2005-17/12/2006, sensor MODIS. d) desmatamento verificado pelo sensor TM datado de 14/07/2005, RGB: TM5-TM4-TM3. e) área vegetada antes do desmatamento registrada pelo sensor TM 11/07/2004, RGB: TM5-TM4-TM3. f) série temporal do polígono desmatado e sua respectiva composição colorida na figura 8c. As áreas em roxo referem-se às áreas com desmatamento no período.

A título de validação dos resultados, duas imagens de mais alta resolução do sensor TM, Landsat 5, datadas de 11/07/2004 e de 14/07/2005 foram utilizadas. Nota-se, pela Figura 8d e 8e, que de fato ocorreu o desmatamento no ano de 2005, assim como está inferindo a série. A ACP mostrou-se bastante eficaz para detectar o desmatamento, baseando-se apenas nos maiores valores de suas principais componentes (associadas à mudança no espectro temporal da floresta). Esta técnica, entretanto, aplica-se só nos polígonos previamente desmatados, sendo, por isso, denominada semiautomática. Se por um lado a detecção semiautomática de desmatamento proposta neste trabalho não serve para a mitigação das perdas florestais, por outro, serve para localizar dentro da série temporal quando este desmatamento de fato ocorreu. Isto tem relevância em termos ecológicos de regeneração e desenvolvimento florestal, pois as florestas mais jovens tendem a ser menos biodiversas e mais suscetíveis do que as florestas primárias.

4. Conclusões

Com base nos resultados chegou às seguintes conclusões:

- A análise de fragmentador assimétrico não detectou claramente as datas de desmatamento, com base na assimetria e grau de complexidade de forma da série temporal. Contudo, outras transformações poderiam ser testadas com o intuito de melhor discriminar a série temporal, tal como a entropia máxima;
- A análise de componentes principais mostrou-se adequada para detectar as mudanças no espectro temporal da floresta, associadas ao desmatamento. Esta, contudo, tem a limitação de ser utilizada de forma semiautomatizada, i.e., adéqua-se apenas quando os polígonos de desmatamento são aplicados na série, o que muitas vezes não estão disponíveis.

Referências Bibliográficas

- ASSIREU, A.T.; ROSA, R.R.; LORENZZETTI, J.A.; VIJAYKUMAR, N.L.; REMPEL, E.L.; RAMOS, F. M.; ABREU DE SÁ, L.D.; BOLZAN, M.J.A.; ZANANDREA, A. Gradient Pattern Analysis of short nonstationary time series: an application to lagrangian data from satellite tracked drifters. **Physica D: Nonlinear phenomena**, v.168. p. 397- 403. 2002.
- ASSIREU, A.T.; LORENZZETTI, J.A.; NOVO, E.M.L.M.; STECH, J.L.; BRAGA, C.Z.F.; LIMA, I.B.T. Aplicação do Operador de Fragmentação Assimétrica (FA) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32. n. 4. p. 501-508, 2004.
- BEHLING, H.; PILLAR, V. Late Quaternary vegetation, biodiversity and fire dynamics on the southern Brazilian highland and their implication for conservation and management of modern Araucaria forest and grassland ecosystems. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, B v. 362. p. 243-251. 2007.
- CUOMO, V.; LANFREDI, M.; LASAPONARA, R.; MACCHIATO, M.F.; SIMONIELLO, T.; Detection of inter-annual variation of vegetation in middle and southern Italy during 1999–1999 with 1 km NOAA AVHRR. **Journal of Geophysical Research**, v. 106. n.17. p. 863–917. 2001.
- FERRAZ, S.F.B.; VETTORAZZI, C.A.; THEOBALD, D.M.; BALLESTER, M.V.R. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. **Forest Ecology and Management**. v.204. p.67-83. 2005.
- FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATA, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v.2. n.1. p. 57-68. 2011.

GALINDO-LEAL, C., 2003. Reunindo as peças: a fragmentação e a conservação da paisagem. In: GALINDO-LEAL, C., CÂMARA, I.G. (Eds.), **The Atlantic Forest of South America: Biodiversity Status, Threats and Outlook**. CABS and Island Press, Washington, p. 372–380. 2003.

GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26. n.1. p. 65–74. 1988.

HIGUCHI, P.; SILVA, A.C.; FERREIRA, T.S.; SOUZA, S.T.; GOMES, J.P.; SILVA, K.M.; SANTOS, K.F. Floristic composition and phytogeography of the tree component of Araucaria Forest fragments in southern Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 35. n.2 p. 145-157. 2012.

HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**. v. 83. p. 195–213. 2002.

INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS DO SUL DA BAHIA (IESB). Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IGEO/UFRJ), Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense (UFF), 2007. **Levantamento da Cobertura Vegetal Nativa do Bioma Mata Atlântica**. Relatório final. PROBIO 03/2004, Brasília, 84p.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Leituras regionais: mesorregião geográfica do Sudeste do Paraná**. Curitiba, 2004. 134p.

LANFREDI, M.; SIMONIELLO, T.; LASAPONARA, R.; CUOMO, V.; MACCHIATO, M.F. Multiresolution spatial characterization of land degradation phenomena in Southern Italy from 1985 to 1999 using NOAA-AVHRR NDVI data. **Geophysical Research Letters**. v.30, p.1069. 2003.

LASAPONARA, R. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological Modelling*. v.194. p. 429–434. 2006.
LEITE, P. F.; KLEIN, R. M. Vegetação. In: FUNDACAO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Geografia do Brasil**. v. 2. Região Sul. Rio de Janeiro: IBGE, p. 113-150, 1990.

MEDEIROS, J.D.; SAVI, M.; BRITO, B.F.A. Seleção de áreas para criação de Unidades de Conservação na Floresta Ombrófila Mista. **Biotemas**. v.8. n. 2. p. 33-50. 2005.

PARANÁ BIODIVERSIDADE (PRBIO). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos/SEMA – Projeto Paraná Biodiversidade: Verde que te quero verde. 2009. 140p.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.J.; HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142. p. 1141–1153. 2009.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. An Introduction. 4. Ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 431p.

ROSA R.R.; SHARMA A.S.; VALDIVIA J.A. Characterization of localized turbulence in plasma extended system. **Physica A**, v.257. p. 509-514. 1998.

SOS Mata Atlântica. Atlas dos remanescentes florestais da mata atlântica período 2008-2010. São Paulo: SOS Mata Atlântica, INPE. 2010. 122p.

SOS Mata Atlântica. *Shapefiles* dos remanescentes florestais 2000 e 2010. Disponível em: <http://mapas.sosma.org.br/dados/>. Acesso em: 23/07/2013.