

MODELAGEM DE ESPECTROS TEMPORAIS NDVI-MODIS, NO PERÍODO DE 2000 A 2008, NA BACIA DO RIO PARACATU, BRASIL

Otacílio Antunes Santana, Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Concepta Margaret McManus Pimentel, Roberto Arnaldo Trancoso Gomes e Sandro Nunes Oliveira

Recebido em 15 julho, 2009 / Aceito em 18 fevereiro, 2010
Received on July 15, 2009 / Accepted on February 18, 2010

ABSTRACT. The objectives of this work were to model the distribution of NDVI-MODIS data, in six distinct targets: Crop Land Areas, Gallery Forest, Cerrado, Pastureland, Urban Areas and Semideciduous Seasonal Forest; and also to analyze the physiognomies changes of the index through of waveform models, period 2000-2008, at the Paracatu River Basin (São Francisco Sub-River Basin). The materials and methods were detached in the steps: (a) getting MODIS images; (b) noise treatment; (c) math modeling of the NDVI temporal signature; and (d) analysis of statistical relation between NDVI and open canopy. The nonlinear regression, waveform model, to spread NDVI by temporal series, got high significance of its parameters (R^2 and p) and tolerable error. With this could identify the physiognomies to be delimited, and to simulate future temporal series by land use, vegetation cover and area extension of each physiognomy. The standard of distribution of the NDVI data showed significant relation with field data of open canopy, this could to be a precise indicator of land use change between the temporal series.

Keywords: nonlinear regression, waveform model, São Francisco River.

RESUMO. Os objetivos deste estudo foram modelar a distribuição de dados NDVI-MODIS, em seis diferentes alvos: Área de Plantio, Floresta de Galeria, Cerrado, Pastagem, Área Urbana e Floresta Estacional Semidecidual; e também analisar as mudanças fisionômicas dos índices através dos modelos ondulatórios, no período de 2000 a 2008, na Bacia do Rio Paracatu (Sub-Bacia do Rio São Francisco). Os materiais e métodos foram subdivididos nas etapas: (a) aquisição das imagens MODIS; (b) tratamento de ruídos; (c) modelagem matemática das assinaturas temporais NDVI; e (d) análise das relações estatísticas entre NDVI e abertura de dossel. A regressão não linear, modelagem ondulatória, para dispersão do NDVI pelas séries temporais, obteve significância de seus parâmetros (R^2 e p) e erros toleráveis. Com isso pôde-se identificar as fisionomias a serem delimitadas, e simular séries temporais futuras, pelo uso da terra, coberturas vegetais e tamanho da área de cada fisionomia. O padrão de distribuição dos dados de NDVI apresentou significativa relação com dados de campo de abertura de dossel, podendo ser um preciso indicador da mudança do uso da terra entre as séries temporais.

Palavras-chave: regressão não linear, modelos ondulatórios, Rio São Francisco.

INTRODUÇÃO

O Cerrado é considerado a savana mais diversa do mundo e possui grande importância para os mananciais hídricos, sendo o local onde estão as nascentes das grandes bacias brasileiras, como a Bacia Amazônica (Rios Araguaia e Tocantins), a Bacia do Rio Paraná-Paraguai e a Bacia do Rio São Francisco (Silva et al., 2006). Historicamente, o desmatamento desse bioma foi devido à criação de gado, e parte dessa área tem sido convertida em plantios, incluindo o estabelecimento de grandes pólos de irrigação (Klink & Machado, 2005). Logo, nas últimas três décadas, mais de 50% da área original do Cerrado são utilizadas por atividades agropecuárias (Machado et al., 2004). Essa tendência pode ser comprovada pelas plantações de soja, cuja área dobrou no período de 1990 a 2000, e a produção quadruplicou devido à mecanização agrícola. Calcula-se que aproximadamente seis milhões de hectares de soja sejam plantados anualmente nesta região. A perda da vegetação natural tem inúmeras mudanças e conseqüências para o meio ambiente como: alteração no estoque de carbono e nitrogênio, emissões de gases poluentes, adulteração na qualidade da água e perda de biodiversidade (Myers et al., 2000; Melillo et al., 2001).

Determinar os padrões espaciais e temporais da expansão agrícola é o primeiro passo no planejamento regional do meio ambiente e socioeconômico. Neste propósito, o sensoriamento remoto mostra-se como uma técnica adequada por fornecer subsídios para o monitoramento constante da superfície terrestre. O advento de sensores com alta resolução temporal, por conceber informações contínuas no tempo, promove uma nova abordagem no processamento de dados em sensoriamento remoto, com a geração e tratamento de assinaturas temporais provenientes de índices de vegetação (Huet et al., 2002; Shimabukuro et al., 2006).

As assinaturas temporais permitem distinguir a vegetação nativa das áreas com uso agropecuário. A vegetação nativa possui uma maior complexidade e variação temporal, devido às mudanças fenológicas de suas espécies, que contrapõe a uniformidade das plantações que apresentam um período de folhas verdes e outro com solo exposto, após a colheita (Ustin et al., 2004; Sakamoto et al., 2005; Wardlow et al., 2007).

A assinatura temporal de uma fisionomia vegetal demonstra uma variabilidade inter e intra-anual que reflete respectivamente a estágios de sucessão e fenologia das plantas. Desta forma, estes espectros apresentam períodos semelhantes, que podem ser caracterizados com alto valor de significância a partir do emprego de modelos ondulatórios e estocásticos (Bates & Watts, 1988; Zar, 1999; Mallet et al., 2008).

O objetivo deste estudo foi analisar (identificar, tratar e modelar) as assinaturas temporais de índices de vegetação NDVI do sensor MODIS, entre o período de 2000-2008, na Bacia do Rio Paracatu.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Bacia do Rio Paracatu, uma das principais sub-bacias do Rio São Francisco, ocupando mais de 50% da área desta Bacia (Fig. 1). Engloba quatorze municípios da região noroeste do Estado de Minas Gerais (Cabeceira Grande, Unai, Paracatu, Natalândia, Dom Bosco, Brasilândia de Minas, Santa Fé de Minas, João Pinheiro, Lagoa Grande, Guarda-Mor, Vazante, Lagamar, Varjão de Minas e Patos de Minas) e pequenas áreas no sudeste do Estado de Goiás e leste do Distrito Federal.

O clima é tropical, com variações térmicas pequenas e regime pluviométrico caracterizado por máximos no verão e mínimos no inverno. Apresentam totais anuais de precipitação decrescendo de 1600 mm a 1000 mm, no sentido oeste-leste e chuvas concentradas nos meses de outubro a abril (PLANPAR, 1998).

Quanto à geologia, a área é constituída pela Formação Vazante, Grupo Canastra, Grupo Paranoá, Subgrupo Paraopeba (pertencente ao Grupo Bambuí) e os depósitos Cenozóicos formados pela cobertura detrito-lateríticas dos períodos Terciário – Quaternário (Scislewski et al., 2003).

As classes de solos predominantes na área são os latossolos, argissolos e neossolos (EMBRAPA, 1999). A ocorrência das feições cársticas principais ocorrem nas áreas dissecadas, sobre a Formação Vazante, próximo ao Grupo Canastra e os solos que estão presentes nessas feições são principalmente os cambissolos, os neossolos litólicos e os latossolos vermelhos.

PLANPAR (1998) realizou um estudo geomorfológico que englobou a Bacia do Rio Paracatu definindo as seguintes unidades: Planalto do São Francisco, Cristas de Unai e Depressão Sanfranciscana. Os planaltos são representados por superfícies tabulares ou chapadas. As cristas são alinhamentos orientados na direção NNW-SSE, entre as quais se intercalam zonas rebaixadas e aplainadas. Ao longo das cristas, existem formas cársticas típicas, como dolinas, grutas e cavernas. A Depressão Sanfranciscana é uma área rebaixada e aplainada com cotas variando entre 400 m e 600 m.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi subdividida nas seguintes etapas: (a) aquisição das imagens MODIS; (b) tratamento de ruídos; (c) modelagem matemática das assinaturas temporais NDVI (*Normalized Diffe-*

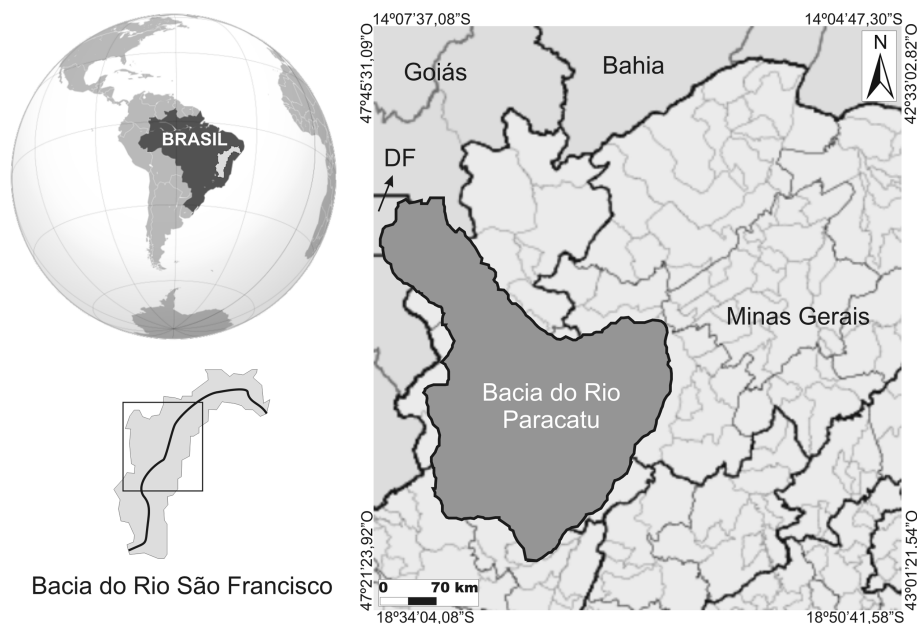


Figura 1 – Localização da área de estudo: Bacia do Rio Paracatu (DF/GO/MG).

rence Vegetation Index – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, MOD13); e (d) análise das relações estatísticas entre o índice de vegetação com a abertura de dossel.

Aquisição das imagens MODIS

O sensor MODIS é um dos cinco instrumentos a bordo do satélite TERRA (EOS-AM-1). As suas imagens são disponibilizadas gratuitamente pela NASA e possuem alta resolução temporal, que varia de 1 a 16 dias (Justice et al., 2002). Além disso, são oferecidas imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis, entre outros) e georreferenciadas.

Dentre os produtos MODIS relacionados ao estudo da vegetação estão: (a) MOD13 – Índices de Vegetação, (b) MOD15 – Índice de Área Foliar/ FPAR e (c) MOD17 – Produtividade Primária Líquida/Fotossíntese Líquida. O MOD13 possui o índice de vegetação: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada). O índice NDVI é sensível à clorofila e possui a seguinte formulação (Rouse et al., 1973).

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

onde, ρ_{IVP} é o valor da reflectância no infravermelho próximo (800-1100 nm) e ρ_V é a reflectância na faixa do vermelho (600-700 nm). Esse índice minimiza as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados para dados multitemporais. Os valores

obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1.

No presente trabalho são utilizadas as seqüências de imagens NDVI (produto MOD13Q1) de janeiro de 2000 a dezembro de 2008 com resolução de 250m, totalizando 205 imagens. Os dados, originalmente na projeção integerized sinusoidal, foram convertidos para a projeção universal transversa de mercator (UTM WGS 184, Fuso 23S) por meio do programa MODIS reprojection tool, disponibilizado gratuitamente pela NASA.

Para obter os espectros de NDVI as imagens relativas às diferentes datas devem ser unidas, formando um cubo de imagens temporais. Desta forma, o cubo apresenta nos eixos “x” e “y” as coordenadas geográficas e no eixo “z” o espectro temporal NDVI. Os espectros temporais são ordenados no cubo utilizando a seqüência dos dias do ano em ordem crescente.

Tratamento de ruídos

A assinatura temporal dos índices de vegetação apresenta uma forte interferência de ruídos, o que ocasiona variações indesejáveis que prejudicam a análise espectral. Para obter um espectro NDVI-MODIS temporal mais suavizado foi utilizada a combinação de dois métodos (Carvalho Júnior et al., 2008a): (a) emprego do filtro de mediana ao longo do espectro, e (b) emprego da transformação Minimum Noise Fraction (MNF) um procedimento estatístico no âmbito da Análise de Principais Componentes (Green et al., 1988), que concilia tanto os procedimentos

de segregação da componente ruído como também de redução da dimensionalidade dos dados.

A filtragem por mediana utilizou uma dimensão de janela de 9×9 e passo igual a 1, minimizando as variações presentes. Complementarmente, foi aplicada a transformação MNF desenvolvida para o tratamento de imagens hiperespectrais e que se mostra também adequada no processamento de imagens de séries temporais MODIS no ambiente de Cerrado (Carvalho et al., 2006). O procedimento para eliminar os ruídos pelo método MNF possui as seguintes etapas: (a) efetuar a transformação MNF na imagem, (b) identificar pela qualidade da imagem e pelo gráfico de autovalores as bandas relativas ao sinal e ao ruído e (c) efetuar a transformação inversa do MNF utilizando somente as bandas relativas ao sinal (Carvalho Júnior et al., 2002).

Modelagem matemática

Nove modelos matemáticos de regressão não linear com distribuição ondulatória (Tab. 1 – Manley, 1950) foram testados nas assinaturas temporais em seis fisionomias registradas: i) Área de Plantio; ii) Floresta de Galeria; iii) Cerrado; iv) Pastagem; v) Área Urbana; e vi) Floresta Estacional Semidecidual. As equações (Tab. 1) significativas que se ajustam aos dados ($y =$ NDVI e $x =$ espectros temporais) e seus padrões de distribuição (médias e amplitudes) permitem definir os alvos presentes em outras células e a ocorrência de mudanças. Os modelos foram calculados pelo programa Statistica 9.0 pelo método de incremento de variáveis passo a passo (StatSoft, 2008). A variável dependente (y) foi representada pelo NDVI, enquanto a variável independente (x) pelas datas das séries temporais.

A partir das equações dos modelos, foram estimados valores de NDVI nas diferentes fisionomias estudadas. O Erro residual de cada modelo foi obtido pela seguinte fórmula (Zar, 1999):

$$\text{Erro residual (\%)} = \frac{\text{Dado Real} - \text{Dado Estimado}}{\sum \text{Dado Real} - \text{Dado Estimado}} \cdot 100$$

Esses modelos também foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R^2) da análise de regressão e pelo nível de significância (p). A partir destes índices foi estimado o melhor modelo para cada alvo em estudo.

Aferimento e detecção de mudanças das fitofisionomias

Para aferimento e acompanhamento dos espectros NDVI-MODIS ao longo dos anos de estudo, foram adquiridas imagens Landsat 5 TM (disponibilizada pelo INPE no *site*: www.inpe.br), do final

do período chuvoso (março) e final do período seco (outubro) dos anos de 2000 a 2008, com melhor resolução espacial de 30 m.

Neste contexto, foram selecionadas áreas que tanto se mantiveram intactas, demonstrando uma variabilidade e dinâmica sazonal natural, como também, áreas onde ocorrem mudanças por ação antrópica (Latorre et al., 2007; Carvalho Júnior et al., 2008b). Dentre as áreas naturais foram selecionados os seguintes pontos: i) Floresta de Galeria ($17^{\circ}00'56,99''S$ e $45^{\circ}43'00,64''O$); ii) Cerrado ($16^{\circ}39'09,22''S$ e $45^{\circ}45'50,87''O$); e iii) Floresta Estacional Semidecidual ($16^{\circ}30'25,82''S$ e $46^{\circ}57'56,33''O$). Para demonstrar áreas com mudanças antrópicas foram identificadas localidades inicialmente com áreas nativas e que passaram a ter, recentemente, uma ocupação, como: i) Área de Plantio de soja da Fazenda Santa Maria ($16^{\circ}27'21,31''S$ e $47^{\circ}07'47,49''O$); ii) a Área de Pastagem da Fazenda Palestina ($16^{\circ}54'12,57''S$ e $46^{\circ}11'34,99''O$); e iii) as Áreas Urbanas (setor com casas e diversas construções, em rua asfaltada) de João Pinheiro ($17^{\circ}44'10,92''S$ e $46^{\circ}10'27,50''O$), Unai ($16^{\circ}20'59,25''S$ e $46^{\circ}54'47,87''O$) e Vazante ($17^{\circ}58'46,55''S$ e $46^{\circ}54'30,78''O$).

Relação dos índices de vegetação com a abertura de dossel

Levantamento de campo foi realizado no final do período chuvoso (20 de março de 2008) e final do período seco (23 de setembro de 2008), onde foram identificadas: (a) posição geográfica (com GPS), (b) fisionomias, e (c) abertura de dossel (%), que é a porcentagem de luz que atravessa o dossel da vegetação, mensurada por um analisador LAI-2000 (LI-COR, Plant Canopy Analyzer – LI-COR, 1992).

A relação da abertura de dossel (%) com o NDVI, relativos aos dias de atividades de campo, foi realizado por análises de regressão com ajustes lineares e não lineares, considerando coeficientes de determinação significativos ($R^2 > 0,5$ e $p < 0,05$). O estabelecimento desta relação permite estimar a abertura de dossel para anos anteriores, utilizando o programa Spatially Explicit individual-based Forest-Simulator 1.0.0 (SEI-FS, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Assinaturas Temporais NDVI-MODIS

O tratamento de ruídos pela combinação dos métodos de filtragem e da transformação MNF permitiu uma acentuada suavização das curvas temporais, eliminando as feições provenientes de nuvens ou erros da imagem (Fig. 2). As assinaturas temporais selecionadas se diferenciaram pelas amplitudes e médias. Estes resultados corroboram com os resultados obtidos em outras áreas de Cer-

Tabela 1 – Modelos de distribuição ondulatória dos dados e suas respectivas equações.

	Modelos	Equações
1	Sine, 3 Parameter	$y = a \sin \left(\frac{2\pi x}{b} + c \right)$
2	Sine, 4 Parameter	$y = y_0 + a \sin \left(\frac{2\pi x}{b} + c \right)$
3	Sine Squared, 3 Parameter	$y = a \left[\sin \left(\frac{2\pi x}{b} + c \right) \right]^2$
4	Sine Squared, 4 Parameter	$y = y_0 + a \left[\sin \left(\frac{2\pi x}{b} + c \right) \right]^2$
5	Damped Squared, 4 Parameter	$y = a e^{-\left(\frac{x}{d}\right)} \sin \left(\frac{2\pi x}{b} + c \right)$
6	Damped Squared, 5 Parameter	$y = y_0 + a e^{-\left(\frac{x}{d}\right)} \sin \left(\frac{2\pi x}{b} + c \right)$
7	Modified Sine	$y = a \sin \left(\frac{\pi(x-x_0)}{b} \right)$
8	Modified Sine Squared	$y = a \left[\sin \left(\frac{\pi(x-x_0)}{b} \right) \right]^2$
8	Modified Sine Squared	$y = a \left[\sin \left(\frac{\pi(x-x_0)}{b} \right) \right]^2$
9	Modified Damped Sine	$y = a e^{-\left(\frac{x}{d}\right)} \sin \left(\frac{\pi(x-x_0)}{b} \right)$

rado (Carvalho Júnior et al., 2006, 2008a) e Pantanal (Rizzi & Rudorff, 2007; Adami et al., 2008). Em ordem decrescente de média dos índices de vegetação, foram registradas: Área de Plantio, Floresta de Galeria, Floresta Estacional Semidecidual, Cerrado, Pastagem e Área Urbana (Fig. 2).

As áreas com maior cobertura vegetal apresentaram também os maiores desvios e erros padrões da média (Fig. 2), devido aos seguintes fatores: i) variação estacional da redução das folhas resultado da sazonalidade do regime de chuvas, conforme descrito por Sakamoto et al. (2006), e observado na Floresta Estacional; e ii) pela Área de Plantio, apresentando altos desvios, por possuírem intensa produção foliar e colheitas em um período curto, corroborando com dados de Zhang et al. (2003).

Modelagem

Todos os modelos utilizados nos seis alvos foram significativos ($R^2 > 0,75$ e $p < 0,025$) (Tab. 2; Fig. 2). Os modelos com melhores ajustes ($R^2 > 0,75$ e $p < 0,025$) foram: (a) Sine – 4 Parameter e (b) Sine Squared – 4 Parameter. Segundo Manley (1950), esses dois modelos iniciam com valores acima de zero para o coeficiente y_0 , o que lhes confere um melhor ajuste, pois mesmo em ambientes urbanos os índices iniciais não são nulos, e com um melhor ajuste a *outliers*.

Os maiores erros residuais são das áreas com maiores amplitudes médias de NDVI, porém os erros não ultrapassam em médias os 15% (Fig. 2). Para Galford et al. (2008), erros até 25% podem ser aceitos, devido aos conjuntos de variáveis envolvidas para obtenção dos índices de vegetação (por exemplo, nuvens e regimes de chuvas). Os resultados demonstram que a principal variação das assinaturas temporais é proveniente da amplitude e da média dos dados.

Deteção de mudança

Nas assinaturas temporais com presença de mudanças foram aplicados diferentes modelos matemáticos considerando cada comportamento de alvo detectado (Tab. 2). As variações observadas foram confirmadas com dados de campo e de imagens TM-Landsat referente à data que ocorreu a modificação do padrão.

As mudanças são caracterizadas através da amplitude, da média e do ajuste da equação dos dados e salientam uma pronunciada ruptura (Fig. 3). A partir disso, oito padrões de mudanças foram identificados: (a) de Cerrado para Área de Plantio (Fig. 4A); (b) de Cerrado para Pastagem (Fig. 4B); (c) de Cerrado para Área Urbana (Fig. 4C); (d) de Floresta de Galeria para Área de Plantio (Fig. 4D); (e) de Floresta de Galeria para Pastagem (Fig. 5A); (f) de Floresta de Galeria para Área Urbana (Fig. 5B); (g) de Pas-

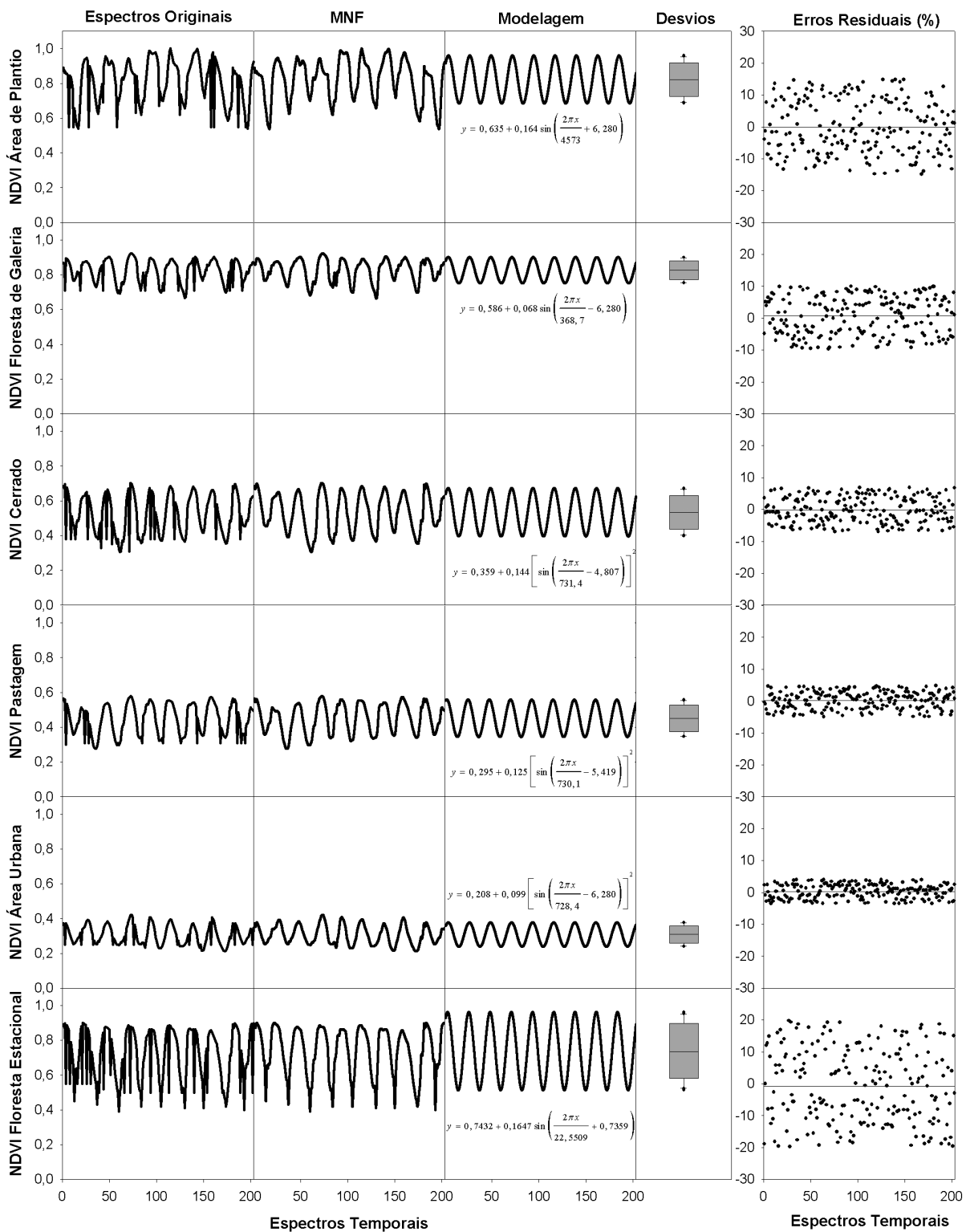


Figura 2 – Variação temporal (a cada 16 dias) dos índices de vegetação NDVI de janeiro de 2000 a dezembro de 2008, das fisionomias: Área de Plantio, Floresta de Galeria, Cerrado, Pastagem, Área Urbana e Floresta Estacional Semidecidual, na Bacia do Rio Paracatu. São apresentados os espectros originais, espectros com eliminação de ruídos por Minimum Noise Fraction (MNF), espectros modelados e suas respectivas equações de ajuste, desvios estatísticos e erro residual dos modelos.

Tabela 2 – Equações e parâmetros (R^2 e p) da modelagem dos espectros temporais NDVI, na Bacia do Rio Paracatu, de seis fisionomias.

Relação	Equação	R^2	p
NDVI-Urbana	$y = 0,208 + 0,099 \left[\sin \left(\frac{2\pi x}{728,4} - 6,280 \right) \right]^2$	0,76	0,001
NDVI-Pastagem	$y = 0,295 + 0,125 \left[\sin \left(\frac{2\pi x}{731,4} - 4,807 \right) \right]^2$	0,89	0,025
NDVI-Cerrado	$y = 0,359 + 0,144 \left[\sin \left(\frac{2\pi x}{730,1} - 5,419 \right) \right]^2$	0,80	0,015
NDVI-Floresta de Galeria	$y = 0,586 + 0,068 \sin \left(\frac{2\pi x}{368,7} - 6,280 \right)$	0,78	0,013
NDVI-Área de Plantio	$y = 0,635 + 0,164 \sin \left(\frac{2\pi x}{457,3} + 6,280 \right)$	0,75	0,001
NDVI-Floresta Estacional	$y = 0,7432 + 0,1647 \sin \left(\frac{2\pi x}{22,5509} + 0,7359 \right)$	0,92	0,001

tagem para Área Urbana (Fig. 5C) e (h) de Pastagem para Área de Plantio (Fig. 5D). Não foram detectadas mudanças nos pixels na escala de NDVI-MODIS da Floresta Estacional para áreas antropizadas, possivelmente pela ocorrência desta fitofisionomia em regiões com relevo acidentado, ou ausência de solo profundo para estabelecimento de agricultura ou pecuária.

As áreas de Cerrado e as de Floresta de Galeria tiveram em sua maioria uma transformação para Área de Plantio, principalmente para pivôs e plantações de soja, conforme registros de Machado et al. (2004) (Figs. 4A e 4D). Também são identificadas transformações referentes à implementação de Pastagens para criação de gado (Figs. 4B e 5A), com o objetivo de fornecimento para as cidades e indústrias sediadas na Bacia do Rio Paracatu (Votorantim: Vazante/MG; Biomig Química Ltda.: João Pinheiro/MG; Carvão Corisco Com. e Representação: Unai/MG), e o próprio crescimento das cidades (Figs. 4C e 5B), reduzindo a área coberta da vegetação nativa. Outro padrão que ficou evidente (Figs. 5C e 5D) foi a modificação de Áreas de Pastagens para Área Urbana, mostrando o crescimento urbano dessa região, e para Área de Plantio, evidenciado pelo crescimento agrícola na região (Klink & Machado, 2005).

A modelagem matemática mostrou satisfatória para a identificação das fisionomias através das séries temporais, corroborando com os resultados de Sakamoto et al. (2006) e Galford et al. (2008). Complementarmente, nas assinaturas temporais foram geradas regressões lineares com o propósito de descrever as tendências promovidas pelas mudanças no espectro. Observa-se que as mudanças temporais relativas às fisionomias para Áreas de Plantio apresentam regressões lineares diretamente proporcionais, enquanto as áreas nativas para Urbanas e Pastagem são

inversamente proporcionais (Figs. 4 e 5), sendo todas significativas ($R^2 > 0,59$ e $p < 0,001$).

Relação dos índices NDVI com a abertura de dossel

Os espectros NDVI-MODIS correlacionados com a abertura de dossel obtida em campo demonstraram um valor de correlação significativo ($R^2 > 0,84$), que corrobora com os dados obtidos por Hoffmann et al. (2005). A reta apresenta uma relação inversamente proporcional entre NDVI e os dados de abertura de dossel (Fig. 6). Cada tipo de alvo mostra-se agrupado em determinados setores da reta da regressão linear.

Desta forma, uma diferenciação dos conjuntos dos dados ficou nítida, evidenciando uma estratificação, onde: a Floresta de Galeria possui os maiores valores de NDVI e menor abertura de dossel; o Cerrado um comportamento oposto; e a Floresta Estacional apresenta um conjunto de dados com maior dispersão que as demais fitofisionomias. Áreas de vegetação não nativa (Área de Plantio, Área Urbana e Pastagem) não foram utilizadas para esta análise, pois possuíam o valor de abertura de dossel de 100%.

A estimativa da abertura de dossel (%) de todas as áreas nativas ao longo das séries temporais apresentou um aumento (de 48,74% para 57,57%, Fig. 7), sendo que especificamente, no Cerrado teve um aumento da abertura de dossel de passou de 74,85% para 86,08%, na Floresta de Galeria de 27,03% para 31,05%, e na Floresta Estacional de 44,14% para 55,12%, corroborando estes dados com as mudanças no uso da terra e redução dos ambientes naturais (Machado et al., 2004; Hoffmann et al., 2005; Klink & Machado, 2005).

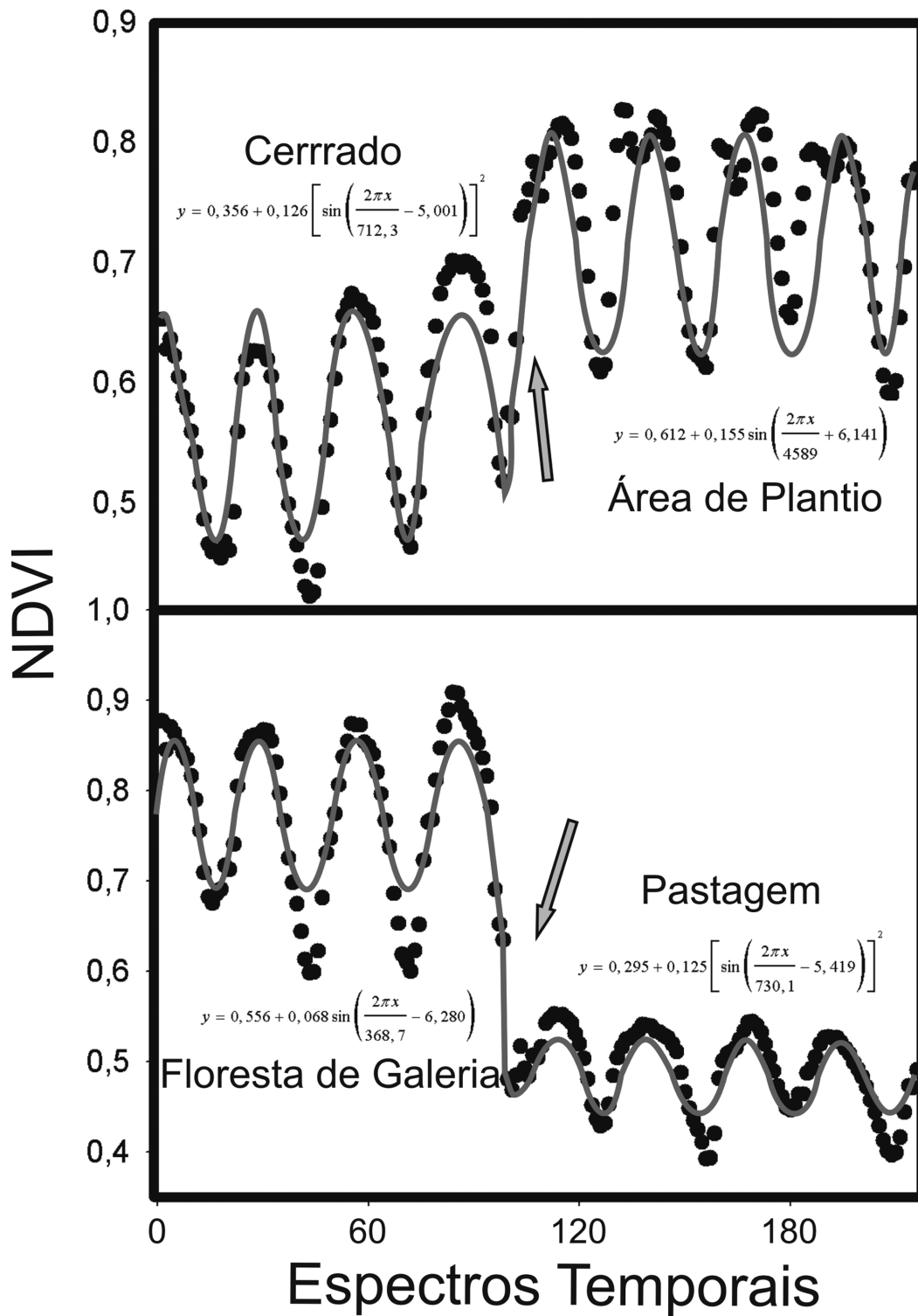


Figura 3 – Exemplo de mudanças de NDVI detectadas nos espectros temporais de duas fisionomias nativas (Cerrado: 16°21'03,52"S e 46°56'11,80"O e Floresta de Galeria: 15°59'58,49"S e 47°13'00,39"O) para duas fisionomias não nativas (Área de Plantio e Pastagem), respectivamente, e a zona de ruptura dos modelos (⇐⇒).

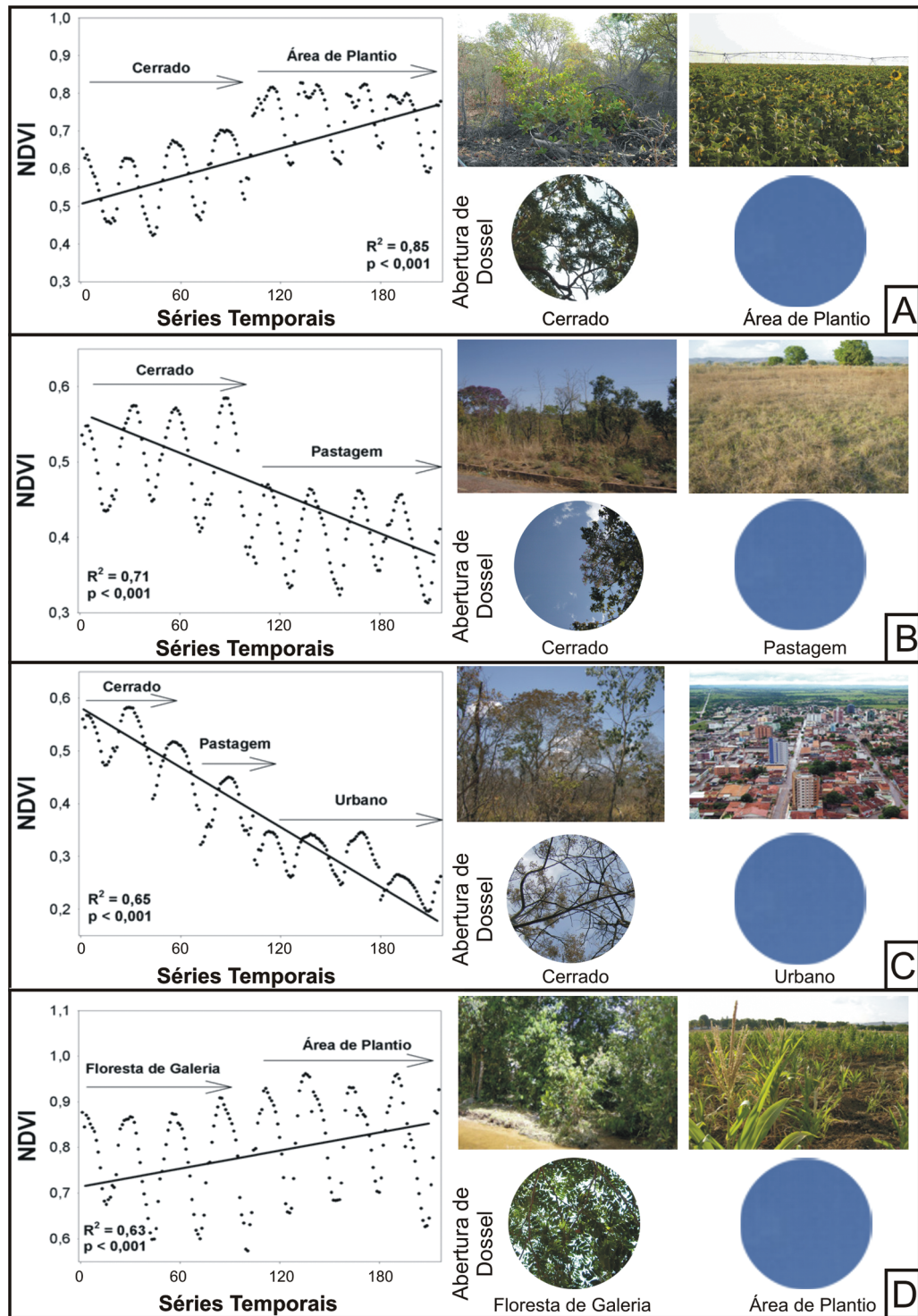


Figura 4 – Relação dos valores índice de vegetação NDVI de janeiro de 2000 a dezembro de 2008 (a cada 16 dias), dos pixels que obtiveram mudança de Cerrado a Área de Plantio (4A) $16^{\circ}21'03,52''S$ e $46^{\circ}56'11,80''O$; de Cerrado a Pastagem (4B) $16^{\circ}20'34,56''S$ e $46^{\circ}57'48,73''O$; de Cerrado a Área Urbana (Unai/MG) (4C) $16^{\circ}20'59,25''S$ e $46^{\circ}54'47,87''O$; e de Floresta de Galeria a Área de Plantio (4D) $16^{\circ}00'47,64''S$ e $47^{\circ}06'52,98''O$; na área da Bacia do Rio Paracatu. A reta representa o ajuste linear (R^2 = coeficiente de determinação e p = nível de significância). Fotos e abertura de dossel representativos da área de mudança temporal.

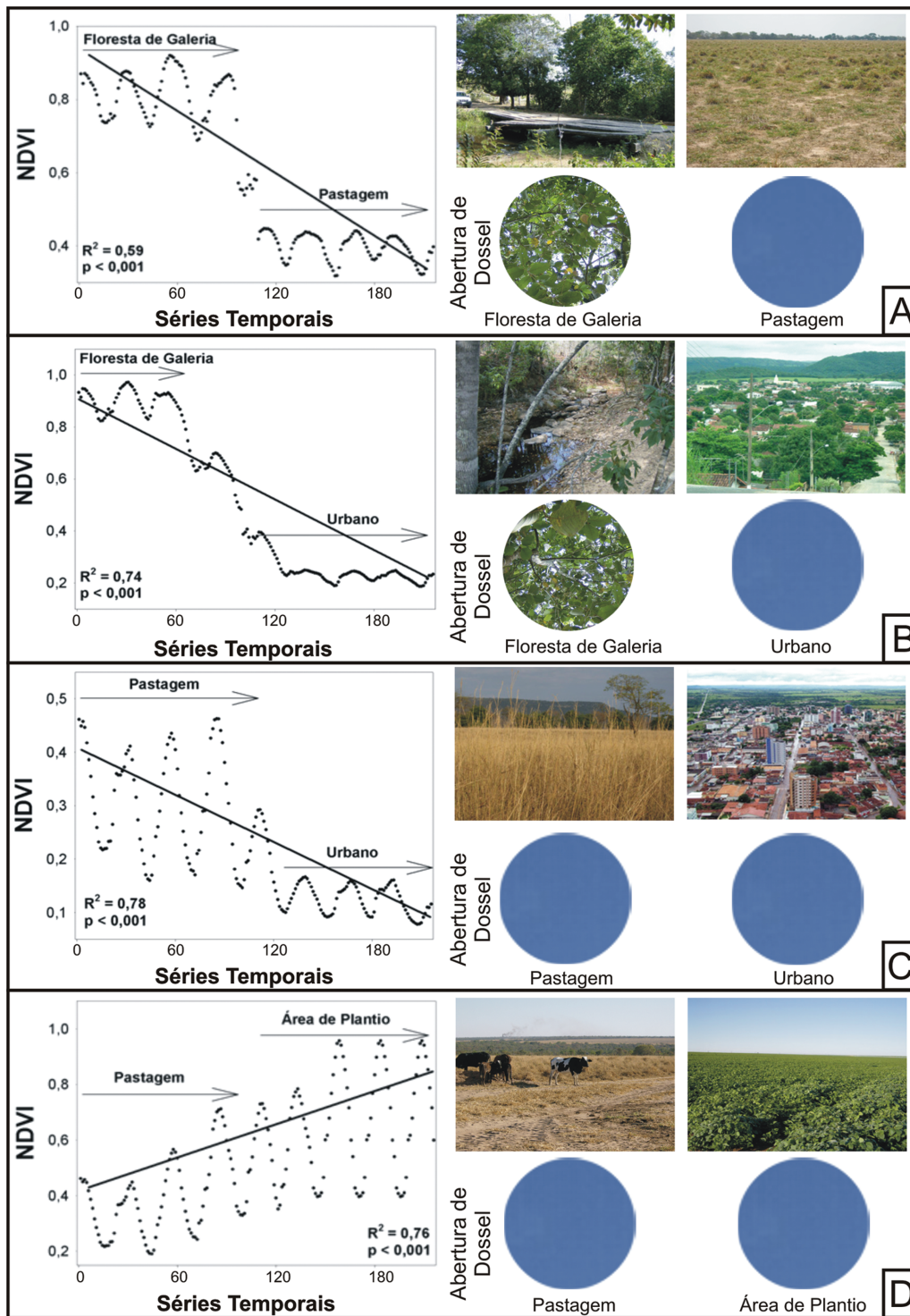


Figura 5 – Relação dos valores índice de vegetação NDVI de janeiro de 2000 a dezembro de 2008 (a cada 16 dias), dos pixels que obtiveram mudança de Floresta de Galeria a Pastagem (5A) 15°59'58,49''S e 47°13'00,39''O; de Floresta de Galeria a Área Urbana (Vazante/MG) (5B) 17°58'46,55''S e 46°54'30,78''O; de Pastagem a Área Urbana (João Pinheiro/MG) (5C) 17°44'48,29''S e 46°09'45,49''O; e de Pastagem a Área de Plantio (5D) 17°44'00,87''S e 46°16'12,88''O, na área da Bacia do Rio Paracatu. A reta representa o ajuste linear (R^2 = coeficiente de determinação e p = nível de significância). Fotos e abertura de dossel representativos da área de mudança temporal.

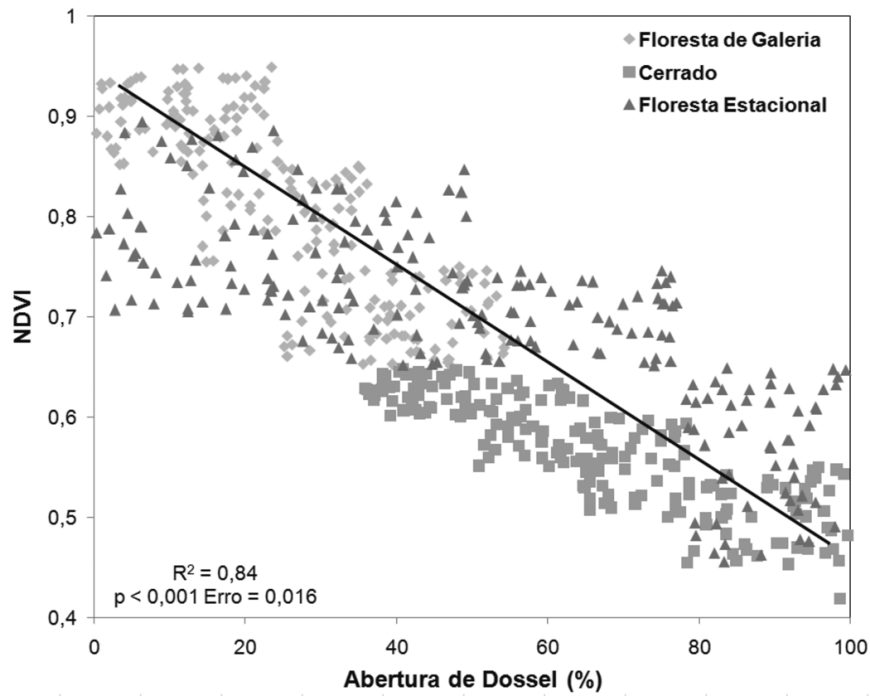


Figura 6 – Relação entre o índice de vegetação NDVI, produto MODIS (MOD13Q1), de janeiro de 2000 a dezembro de 2008 (a cada 16 dias) com a abertura de dossel (%) das áreas dos pixels representativos das fisionomias: Floresta de Galeria, Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual. R^2 = coeficiente de determinação, p = nível de significância e Erro da regressão linear dos dados.

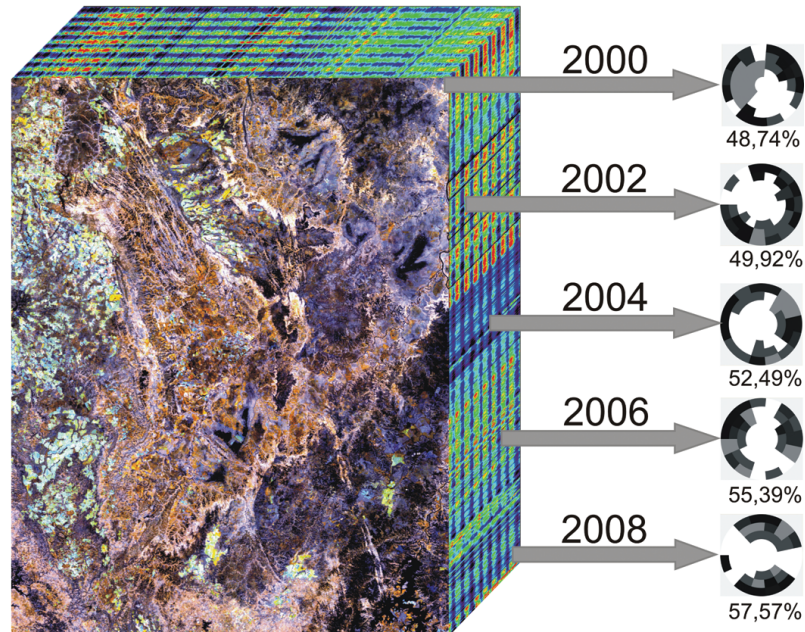


Figura 7 – Relação entre o índice de vegetação NDVI, produto MODIS (MOD13Q1), de janeiro de 2000 a dezembro de 2008 (a cada 16 dias) com a abertura de dossel (%) das áreas dos pixels representativos das fisionomias: Floresta de Galeria, Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual. R^2 = coeficiente de determinação, p = nível de significância e Erro da regressão linear dos dados.

CONCLUSÕES

A regressão não linear, modelagem ondulatória, para dispersão dos dados de NDVI pelas séries temporais, mostrou-se satisfatória, pela alta significância de seus parâmetros e erros toleráveis. Pôde-se identificar de forma individual as fisionomias a serem delimitadas e simular, pelo uso da terra, coberturas vegetais e tamanho da área de cada fisionomia em séries temporais futuras.

Os dados de NDVI foram corroborados pela significativa relação com dados de campo de abertura de dossel, podendo ser um preciso indicador da mudança do uso da terra entre as séries temporais, o que ocorreu na área de estudo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela Bolsa de Pós-Doutorado Júnior para o primeiro autor. À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) pelos recursos financeiros conseguidos através do Edital 02/2008, Processo nº 193.000.149/2008.

REFERÊNCIAS

- ADAMI M, FREITAS RM, PADOVANI CR, SHIMABUKURO YE & MOREIRA MA. 2008. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(10): 1371–1378.
- BATES DM & WATTS DG. 1988. *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*. New York: Wiley, 384 p.
- CARVALHO FMV, FERREIRA LG, LOBO FC, DINIZ-FILHO JAF & BINI LM. 2006. Padrões de autocorrelação espacial de índices de vegetação MODIS no bioma Cerrado. *Revista Árvore*, 32(2): 279–290.
- CARVALHO JÚNIOR OA, CARVALHO APF, MENESES PR & GUIMARÃES RF. 2002. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(1): 31–41.
- CARVALHO JÚNIOR OA, HERMUCHE PM & GUIMARÃES RF. 2006. Identificação regional da Floresta Estacional Decidual na bacia do Rio Paranã a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(3): 319–332.
- CARVALHO JÚNIOR OA, SAMPAIO CS, SILVA NC, COUTO JÚNIOR AF, GOMES RAT, CARVALHO APF & SHIMABUKURO YE. 2008a. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional Chapada dos Veadeiros. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(4): 505–517.
- CARVALHO JÚNIOR OA, COELHO MAN, MARTINS ES, GOMES RAT, COUTO JÚNIOR AF, OLIVEIRA SN & SANTANA OA. 2008b. Mapeamento da vegetação na Floresta Atlântica usando o classificador de árvore de decisão para integrar dados de sensoriamento remoto e modelo digital de terreno. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(3): 331–345.
- EMBRAPA. 1999. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA: Produção de Informação, 412 p.
- GALFORD G, MUSTARD J, MELILLO J, GENDRIN A, CERRI CC & CERRI CEP. 2008. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 112: 576–587.
- GREEN AA, BERMAN M, SWITZER P & CRAIG MD. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(1): 65–74.
- HOFFMANN WA, SILVA JR ER, MACHADO GC, BUCCI SJ, SCHOLZ FG, GOLDSTEIN G & MEINZER FC. 2005. Seasonal leaf dynamics across a tree density gradient in a Brazilian savanna. *Oecologia*, 145: 307–316.
- HUETE AR, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ P, GAO X & FERREIRA LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195–213.
- JUSTICE CO, TOWNSHEND JRG, VERMOTE EF, MASUOKA E, WOLFE RE, SALEOUS N, ROY DP & MORISETTE JT. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83: 3–15.
- KLINK CA & MACHADO RB. 2005. Conservation of Brazilian Cerrado. *Conservation Biology*, 19: 707–713.
- LATORRE ML, CARVALHO JÚNIOR OA, SANTOS JR & SHIMABUKURO YE. 2007. Integração de dados de sensoriamento remoto multi resoluções para a representação da cobertura da terra utilizando campos contínuos de vegetação e classificação por árvores de decisão. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(1): 63–74.
- LI-COR. 1992. LAI-2000 Plant canopy analyzer: Instruction manual. Lincoln: LI-COR Inc., 179 p.
- MACHADO RB, RAMOS NETO MB, PEREIRA PGP, CALDAS EF, GONÇALVES DA, SANTOS NS, TABOR K & STEININGER EM. 2004. Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro. Brasília: Conservação Internacional, 23 p.
- MALLET C, BRETAR F & SOERGEL U. 2008. Analysis of Full-Waveform Lidar Data for Classification of Urban. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 5: 337–349.
- MANLEY RG. 1950. *Waveform analysis: A guide to interpretation of periodic waves, including vibration records*. London: Chapman & Hall/CRC, 275 p.
- MELILLO JM, STEUDLER PA, FIEFEL BJ, NEILL C, GARCIA D & PICCOLO MC. 2001. Nitrous oxide emissions from forests and pastures of

- various ages in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research*, 106(D24): 179–188.
- MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, DE FONSECA GAB & KENT J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403: 853–858.
- PLANPAR – Plano Diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – relatório de inventário dos recursos hídricos. 1998. In: Sistema de Informação de recursos hídricos. Disponível em: <<http://www.hidricos.mg.gov.br/in-mi.htm>>. Acesso em: 07 jul. 2005.
- RIZZIR & RUDORFF BFT. 2007. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(1): 73–80.
- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA & DEERING DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, 1: 309–317.
- SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, SHIBAYAMA M, ISHITSUKA N & OHNO H. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96: 366–374.
- SAKAMOTO T, NGUYEN NV, OHNO H, ISHITSUKA N & YOKOZAWA M. 2006. Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. *Remote Sensing of Environment*, 100: 1–16.
- SCISLEWSKI G, FRASCA AAS, ARAÚJO VA, RODRIGUES JB & GONÇALVES HS. 2003. Geologia. In: CPRM; EMBRAPA; SCO-MI (Org.). *Zoneamento Ecológico Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – Fase I. 1ª ed.*, Rio de Janeiro, 1: 9–15.
- SEXI-FS – SPATIALLY EXPLICIT INDIVIDUAL-BASED FOREST-SIMULATOR. 2005. Calibration Procedures Version 1.0.0. Disponível em: <<http://www.worldagroforestry.org/sea/Products/AFModels/SEXI>>. Acesso em: 21 ago. 2005.
- SHIMABUKURO YE, DUARTE V, ANDERSON LO, VALERIANO DM, ARAI E, FREITAS RM, RUDORFF BFT & MOREIRA MA. 2006. Near real time detection of deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS imagery. *Ambiente e Água*, 1: 37–47.
- SILVA FJ, FARIÑA MR, FELFILI JM & KLINK CA. 2006. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. *Journal of Biogeography*, 33: 536–548.
- STATSOFT INC. 2008. STATISTICA (data analysis software system). Disponível em: <www.statsoft.com>. Acesso em: 21 set. 2008.
- USTIN SL, ROBERTS DA, GAMON JA, ASNER GP & GREEN RO. 2004. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties. *BioScience*, 54(6): 523–534.
- WARDLOW BD, EGBERT SL & KASTENS JH. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108: 290–310.
- ZAR JH. 1999. *Biostatistical Analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 4th ed. 123 p.
- ZHANG X, FRIEDL MA, SCHAAF CB, STRAHLER AH, HODGES JCF, GAO F, REED BC & HUETE A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84: 471–475.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Otacílio Antunes Santana. Possui graduação em Biologia pela Universidade Católica de Goiás (2000), mestrado em Ciências Florestais pela Universidade de Brasília (2003) e doutorado em Ciências Florestais pela Universidade de Brasília (2007). Fez doutorado sanduíche na Georg-August-Universität Göttingen/Alemanha (2006). Atualmente, é pesquisador do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais do Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, bolsista de pós-doutorado Júnior/CNPq. Tem experiência na área de Ecologia, Modelagem, Botânica, Educação à distância e Avaliação de Impacto Ambiental.

Osmar Abílio de Carvalho Júnior. Recebeu o título de geólogo pela Universidade de Brasília (1990), e de mestre e doutor em prospecção mineral pela Universidade de Brasília em 1995 e 2000, respectivamente. Trabalhou como Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) entre 2002 e 2004. Atualmente, é professor da Universidade de Brasília e bolsista de produtividade e pesquisa do CNPq onde realiza pesquisas sobre o processamento digital de imagens multiespectrais e hiperespectrais.

Concepta Margaret McManus Pimentel. Graduada em Ciências Agrárias pela University College Dublin (1987), possui mestrado em reprodução genética e animal pela University of Edinburgh (1988) e Ph.D. pela University of Oxford (1991), com pós-doutorado pela University of Sydney (2002). Atualmente é professora associada da Universidade de Brasília, bolsista de produtividade do CNPq. Tem experiência na área de Zootecnia, com ênfase em Genética e Melhoramento dos Animais Domésticos, atuando principalmente nos seguintes temas: biotecnologia, adaptação, recursos genéticos animais, parâmetros genéticos e fenotípicos.

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes. Possui graduação em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999). Fez mestrado em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2002) e doutorado em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006). Atualmente é professor adjunto da Universidade

de Brasília, Departamento de Geografia, e bolsista de produtividade e pesquisa do CNPq. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geografia Física. Atuando principalmente nos seguintes temas: Modelos de Previsão, Corridas de Massa, Escorregamentos, Geotecnia, Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia.

Sandro Nunes Oliveira. Possui graduação em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás (2005). É mestre em Geografia, pela Universidade de Brasília (2008), na linha de pesquisa "Geoprocessamento para a Gestão Territorial e Ambiental". Tem experiência na área de Geografia, com ênfase em Geografia Física, atuando principalmente nos seguintes temas: SIG, sensoriamento remoto, erosão acelerada, inundações, alagamentos, assoreamento, geomorfologia e carta de riscos geomorfológicos.