

# ANÁLISE DE ONDALETAS APLICADA A DADOS MULTITEMPORAIS DE NDVI/MODIS

*Roberta ROSEMBACK<sup>1</sup>*

*Nelson Jesus FERREIRA<sup>2</sup>*

*Yosio Edemir SHIMABUKURO<sup>3</sup>*

*Jorge Conrado CONFORTE<sup>4</sup>*

## Resumo

Os estudos sobre a dinâmica sazonal dos biomas partem da premissa de que o comportamento da vegetação seja modulado pelo clima. A fim de observar, no comportamento da vegetação, a influência de eventos climáticos de escalas global e local, tanto cíclicos como não-cíclicos, faz-se necessária uma abordagem que supere os métodos estatísticos tradicionais. Para isto, partiu-se da hipótese de que a análise de ondaletas, comumente utilizada em meteorologia na detecção de diferentes escalas de periodicidade em longas séries de dados, seria apropriada para tanto. O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gerado pelo sistema MODIS/Terra, em composições de 16 dias com resolução espacial de 250m, foi utilizado como variável relacionada a vegetação. A análise de ondaletas foi então empregada à série histórica de 144 composições de NDVI - de fevereiro de 2000 a fevereiro de 2006 - em amostras de 3X3 pixels de três tipos de vegetação diferentes. Embora ainda seja um conjunto de dados pequeno, os resultados sugerem que a técnica proposta possui um grande potencial para a observação da dinâmica sazonal da vegetação e conseqüentemente para observar perturbações no seu comportamento padrão frente a fenômenos climáticos não-cíclicos ou de menor escala.

**Palavras-chave:** Ondaleta. NDVI. Vegetação. Sensoriamento remoto.

## Abstract

### Wavelets analysis applied to NDVI/MODIS multitemporal datasets

The studies about seasonal dynamics of the biomes start from the idea that the vegetation's behavior is modulated by climate. In order to detect the influence of global and local climatic events (both cyclic and non-cyclic) on the vegetation's behavior, was necessary a new approach that could be better than the traditional statistic methods. We started from the hypothesis that the wavelet transform, normally used in weather analysis to depict several periodic scales in long datasets, could be appropriated. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) generated by the MODIS/Terra system, in compositions of 16 days, and spatial resolution of 250m, was used as a variable that represents vegetation. The wavelet transform was applied to the 144 NDVI dataset (feb/2000 – feb/2006) in samples of 3 X 3 pixels, of three different vegetation's types. Although it is still a small dataset, the results suggested that this technique has great potential to observe the seasonal dynamics of vegetation and to depict disturbances on its behavior pattern due to non-cyclical climatic phenomena or in small scales.

**Key words:** Wavelets. NDVI. Vegetation. Remote sensing.

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, bolsista roberta@dsr.inpe.br, Av dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja - CEP: 12227-010, São José dos Campos – SP, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pesquisador titular, nelson@cptec.inpe.br, Av dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja - CEP: 12227-010, São José dos Campos – SP, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pesquisador titular, yosio@dsr.inpe.br, Av dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja - CEP: 12227-010, São José dos Campos – SP, Brasil.

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, conrado@cptec.inpe.br, Av dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja - CEP: 12227-010, São José dos Campos – SP, Brasil.

## INTRODUÇÃO

A observação dos ciclos vegetais, ou seja, a determinação do começo da estação de crescimento, o pico de desenvolvimento das plantas e suas características sazonais é um tema de grande relevância, pois o comportamento dos ecossistemas pode definir seus atributos funcionais e biofísicos, produção primária bruta e biomassa (Yang et al., 1998). Os estudos voltados à caracterização das dinâmicas sazonais dos diversos biomas partem da premissa de que o comportamento dos diferentes tipos de vegetação seja modulado pelo clima (LIU et al., 1991; BARBOSA, 1998; DESSAY et al., 2001; KAWABATA et al., 2001; WANG et al., 2003).

No caso da Floresta Amazônica, na Região Norte do Brasil, as espécies em geral apresentam baixo vigor logo após a estação seca se comparado ao auge, que se dá após a estação chuvosa. Por outro lado, tipos de vegetação como a Mata Atlântica e Floresta Estacional Semidecidual, presentes na Região Sul do Brasil, possuem sazonalidade fraca, ou seja, não sofrem variações bruscas entre as estações (BATISTA et al., 1997; GURGEL, 2000; ANDERSON, 2005). Ao mesmo tempo, ao observar o clima desta região, não são verificadas características sazonais marcantes (BARBIERI, 2005), e portanto as relações entre a vegetação e o clima não são evidentes.

Biomassas como a Amazônia e a Mata Atlântica têm sido amplamente investigadas, porém há ainda uma carência de estudos acerca da vegetação na Região Sul do Brasil. Estudos nesta região se justificam pelo fato dos eventos climáticos de influências globais, como El Niño e La Niña, atuarem de forma inversa no regime de chuvas do sul em relação ao do norte do país. O El Niño intensifica as chuvas na região sul e atenua na norte enquanto o La Niña intensifica na norte e atenua na sul.

O fenômeno climático El Niño é um evento não-cíclico caracterizado pelo aumento da temperatura superficial e sub-superficial das águas do Oceano Pacífico Equatorial. Tem início, em geral, na estação de outono no hemisfério sul, atingindo o máximo no verão, com duração aproximada de um ano e frequência de ocorrência de 2 a 7 anos. Tal anomalia influencia a interação oceano-atmosfera, cuja troca de energia e umidade é responsável pelo comportamento do clima em escala regional e global. O La Niña também não é cíclico, mas diz respeito ao episódio frio do Oceano Pacífico Equatorial e Central. Em geral, tem duração de um ano: inicia-se em meados de um ano, atinge o pico ao final deste ano e se encerra em meados do ano seguinte.

Ainda em escala global, a característica mais marcante dos fenômenos climáticos cíclicos (estações do ano) na Região Sul é o fato de não haver estação chuvosa ou seca tão bem definida quanto em outras regiões do país, a distribuição de chuvas é uniforme (característica do clima temperado), de modo que quase não há áreas com média anual de precipitação excessiva ou escassa (NIMER, 1979). Isso se deve, segundo Satyamurty e Mattos (1989), às passagens de frentes frias pela região.

Em escala local os processos climáticos são caracterizados pela rápida dinâmica e inúmeras instabilidades, portanto não são cíclicos. Na Região Sul do Brasil, pode-se citar como exemplo a ocorrência de geadas, situações de bloqueio e veranicos. Geadas são formações de gelo nas superfícies expostas quando a temperatura do ar é menor que 0°C. Veranicos são curtos períodos de seca. Já em condições de bloqueio, a presença de um anticiclone quase estacionário de grande amplitude interrompe a progressão normal dos sistemas para leste, o que divide o jato de circulação atmosférica em dois ramos, e rompe o padrão zonal.

Com o objetivo de observar a dinâmica de tipos de vegetação que apresentam tanto sazonalidade forte quanto fraca sob a influência de fenômenos climáticos em diferentes escalas de periodicidade, fez-se necessária uma abordagem que superasse os métodos estatísticos tradicionais. Optou-se então pela análise de ondaletas, ainda pouco

utilizada a esta aplicação, mas que apresenta propriedades adequadas ao objetivo proposto.

A ondaleta é utilizada em meteorologia na quantificação das relações tempo-escala dos fenômenos atmosféricos. No caso deste estudo, esta análise foi aplicada a dados de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), variável aqui representante da resposta espectral da vegetação. Em geral as séries temporais utilizadas nas análises de ondaletas são relativamente grandes, para que se possam identificar os ciclos presentes na seqüência de dados. O conjunto de dados disponibilizados pelo sistema MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)/Terra até o presente somam apenas 144 imagens (composições de 16 dias) de NDVI, mas os resultados sugerem que a técnica proposta apresenta um grande potencial para detectar perturbações no comportamento padrão da vegetação frente a fenômenos climáticos não-cíclicos ou de menor escala.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### *Dados de vegetação*

No que se refere à observação e manipulação de variáveis representativas da cobertura vegetal, índices de vegetação obtidos de dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados há mais de duas décadas (ALMEIDA, 1997; ICHII et al., 2002; JIN; SADER, 2005; SEDANO et al., 2005). O NDVI (ROUSE et al., 1973) é uma técnica de processamento de imagens que visa otimizar a exploração dos dados de sensores remotos. É dado pela combinação entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo. A expressão deste índice é dada por:

$$NDVI = \frac{(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(\rho_{ivp} + \rho_v)} \quad (1)$$

Onde:  $\rho_{vp}$  é a refletância no infravermelho próximo;

$\rho_v$  é a refletância no vermelho.

Desde 2000 o sistema MODIS-Terra fornece produtos (MOD13) de NDVI de forma sistemática com resolução espacial moderada, correção atmosférica aprimorada e georreferenciamento mais preciso. Além disso, o MODIS oferece um contraste bom e sofre menos influência atmosférica por possuir a banda do infravermelho próximo mais estreita e bem posicionada (MOREIRA, 2000).

Apesar da série de dados que disponibiliza ser de apenas 6 anos, já é possível inferir características associadas à variabilidade temporal e espacial da vegetação. A resolução espacial moderada (250mX250m) dos dados MODIS vem melhorar o que tem sido feito neste campo de pesquisa.

Para este estudo, foram utilizadas composições de 16 dias do período de fevereiro de 2000 a fevereiro de 2006 (144 composições). A aquisição de dados MODIS é originalmente feita em 12 bits. Os produtos e imagens originais são disponibilizadas ao usuário em 16 bits, no formato HDF. Através do aplicativo NASA-MRT (*MODIS Reprojection Tool*), estas foram convertidas ao formato GEOTIFF. Os valores dos pixels da imagem NDVI, neste estágio, variam em números inteiros. A seguir, as imagens foram convertidas de 16 para 8 bits utilizando o software ConvGeotiff (ARAI et al., 2005) para que pudessem ser inseridas no banco de dados criado no SPRING 4.2 (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas).

### Indicadores de El Niño e La Niña

A tabela 1, produzida pelo *National Weather Service - Climate Prediction Center* da NOAA (2007), apresenta os episódios de El Niño em cinza (números positivos) e de La Niña em preto (números negativos). São os episódios quentes e frios da temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W), no Oceano Pacífico. As anomalias trimestrais foram calculadas a partir da média de um período-base de 29 anos (1971-2000) de temperatura da superfície do mar, com limiar de +/- 0,5°C. A persistência por mais de cinco estações sobrepostas de anomalia positiva ou negativa caracteriza a ocorrência de El Niño ou La Niña respectivamente. Os valores mais altos (em módulo) representam eventos de maior intensidade.

**Tabela 1 – Anomalia de temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4**

	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
<b>1999</b>	<b>-1,6</b>	<b>-1,2</b>	<b>-0,9</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,8</b>	<b>-0,8</b>	<b>-0,9</b>	<b>-0,9</b>	<b>-1,0</b>	<b>-1,2</b>	<b>-1,4</b>	<b>-1,6</b>
<b>2000</b>	<b>-1,6</b>	<b>-1,5</b>	<b>-1,1</b>	<b>-0,9</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,6</b>	-0,4	-0,3	-0,4	<b>-0,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,7</b>
<b>2001</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,5</b>	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,2
<b>2002</b>	-0,1	0,1	0,3	0,4	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>	<b>1,5</b>	<b>1,3</b>
<b>2003</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	0,1	-0,1	0,0	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5
<b>2004</b>	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>
<b>2005</b>	<b>0,6</b>	<b>0,5</b>	0,3	0,4	0,5	0,3	0,2	0,0	0,0	-0,2	-0,4	-0,7
<b>2006</b>	-0,8	-0,7										

Portanto, de acordo com este índice, são demarcados dois eventos de El Niño (um moderado em 2002/2003 e um fraco em 2004/2005), e dois de La Niña (um moderado 1999/2000, e outro curto e fraco em 2000/2001). Esses dados são importantes na interpretação dos resultados gerados pela análise de ondaletas, tendo em vista que tais eventos, independente da sua intensidade, afetam distintamente os vários tipos de vegetação (JACÓBSEN et al., 2002; GURGEL; FERREIRA, 2003).

### Análise por Ondaletas (Wavelet Transform)

Transformações matemáticas são comumente aplicadas no processamento de sinais para obtenção de informações ocultas no domínio da frequência, que são adicionais às disponíveis pelo dado bruto, no domínio do tempo. A Transformada de Fourier tem sido a mais utilizada, porém apresenta algumas limitações quando aplicada a sinais não-estacionários. A Transformada de Ondaletas (GROSSMAN; MORLET, 1984) supera tais limitações.

A Transformada de Fourier utiliza uma janela (função) de tamanho fixo para percorrer o dado. Há a detecção dos tipos de frequência presentes no sinal, mas o tratamento destes é inconsistente, o que impossibilita a detecção de eventos não-cíclicos ou que ocorrem em diferentes escalas de tempo. Outra restrição da Transformada de Fourier diz respeito à localização temporal dos eventos, que é perdida. Nesse sentido, a Transformada de Ondaletas é um avanço em relação à de Fourier (SANTOS et al., 2001).

A Transformada de Ondaletas é uma função matemática que permite analisar sinais não-estacionários pela decomposição das séries temporais em tempo e frequência, assim acusa quais frequências existem no sinal e em qual intervalo de tempo ocorrem. As propri-

idades das matrizes envolvidas na ondaleta são similares às usadas na transformada de Fourier, porém com funções básicas mais complexas (Graps, 1995).

O procedimento consiste na dilatação ou compressão de uma função-mãe em um conjunto de pequenas ondas capazes de detectar as altas e baixas frequências da série de dados, o que possibilita a análise em diferentes escalas temporais. A função-mãe deve ser quadraticamente integrável dentro de um intervalo real, ou espaço  $[L^2(\mathbb{R})]$ , ou seja, deve apresentar energia finita.

Define-se matematicamente a função ondaleta (*wavelet*) numa escala **a** e posição **b**, onde **a** e **b** são valores reais, e **a** > 0, como sendo:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2)$$

A transformada em ondaleta contínua da função  $f(t)$  é definida pela seguinte equação:

$$(W_{\psi}f)(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

onde  $f(t)$  é a função que constitui a série de dados a ser analisada. O termo  $1/\sqrt{a}$  é utilizado para normalizar a energia de cada ondaleta.

A ondaleta aqui utilizada é a de Morlet, que visa analisar a variação temporal brusca ou suave. A função de Morlet é dada pela seguinte expressão:

$$\psi(t) = e^{iw_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (4)$$

As ondaletas geradas utilizam  $w_0 = 6$  e são calculadas da seguinte maneira:

$$\Psi_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{iw_0 \left(\frac{t-b}{a}\right)} e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2} / 2. \quad (5)$$

A análise de ondaletas, neste trabalho, foi gerada a partir da implementação da rotina desenvolvida por Sych et al. (2005) no software IDL.

Nos diagramas gerados pela aplicação da Transformada de Ondaletas, as baixas frequências correspondem ao comportamento sazonal e anual da amostra analisada, o que demarca fenômenos cíclicos. Já as altas frequências acusam mudanças abruptas de comportamento, ou seja, eventos não-cíclicos ou de menor escala.

## ÁREA DE ESTUDO

Foram selecionadas para este estudo três amostras de diferentes tipos de cobertura vegetal da Região Sul do Brasil (Figura 1). Estas amostras foram delimitadas a partir de imagens TM Landsat, cuja resolução espacial é de 30m, a fim de garantir a ausência de outros alvos. São amostras de Campos Úmidos, Floresta Ombrófila Densa Atlântica e Floresta Estacional Semidecidual. A dimensão dessas amostras é 3 X 3 pixels da imagem MODIS, ou seja, 750m X 750m.



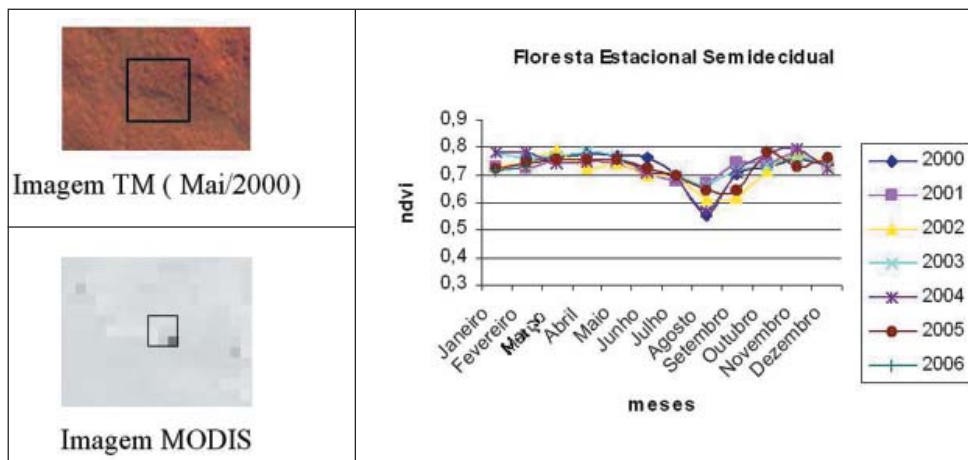
**Figura 1 – Localização das amostras de (1) Campos Úmidos, (2) Floresta Ombrófila Densa Atlântica e (3) Floresta Estacional Semidecidual, na Região Sul do Brasil**

### *Caracterização das amostras*

Para caracterizar as amostras quanto ao seu comportamento durante o período de estudo foram gerados gráficos da variação temporal dos valores médios do conjunto de pixels de cada amostra.

A Floresta Estacional Semidecidual é submetida à dupla sazonalidade, um período de intensas chuvas de verão seguidas por estiagens acentuadas; e outro sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio de inverno, com temperaturas médias inferiores a 15°C. Nos dois casos, 20% a 50% das espécies são caducifólias, ou seja, perdem as folhas no período menos favorável (IBGE, 2004).

Observam-se, no gráfico da figura 2, valores altos de NDVI (entre 0,7 e 0,8) em todas as estações com pequena queda no mês de agosto (0,55 a 0,7). Os valores mais baixos ocorrem no inverno dos anos de 2000 e 2004. Essa característica revela que a cobertura vegetal é caracterizada por uma sazonalidade fraca, ou seja, o NDVI apresenta somente uma pequena variabilidade no inverno.



**Figura 2 - Variação de NDVI em área de Floresta Estacional Semidecidual, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels)**

A Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica) é composta por árvores de grande e médio porte, em áreas sem período seco durante o ano, nas quais a temperatura média oscila entre 22°C e 25°C (IBGE, 2004).

No litoral a umidade é alta o ano todo, assim como os valores de NDVI deste tipo de cobertura vegetal. Apesar de ocorrerem valores mais altos (0,70 a 0,85) no começo do ano, durante o verão e outono, e mais baixos na primavera, com queda dos valores no mês de outubro, a diferença entre eles denota a fraca sazonalidade (Figura 3).

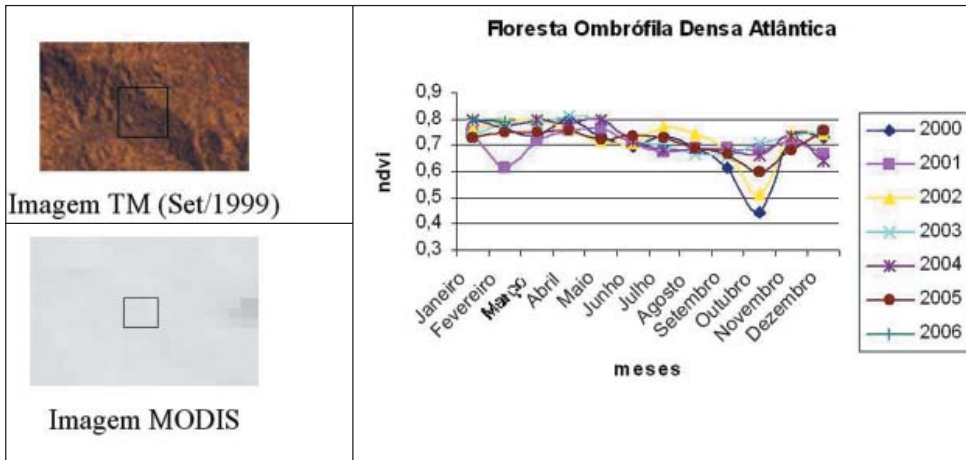


Figura 3 – Variação de NDVI em área de Floresta Ombrófila Densa, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels)

Na área de Campos Úmidos situada numa região em que a temperatura média anual não ultrapassa 14°C, onde há ocorrência de neve e a sazonalidade é mais evidente, os valores de NDVI caem bruscamente nos meses de inverno conforme pode ser visualizado na figura 4.

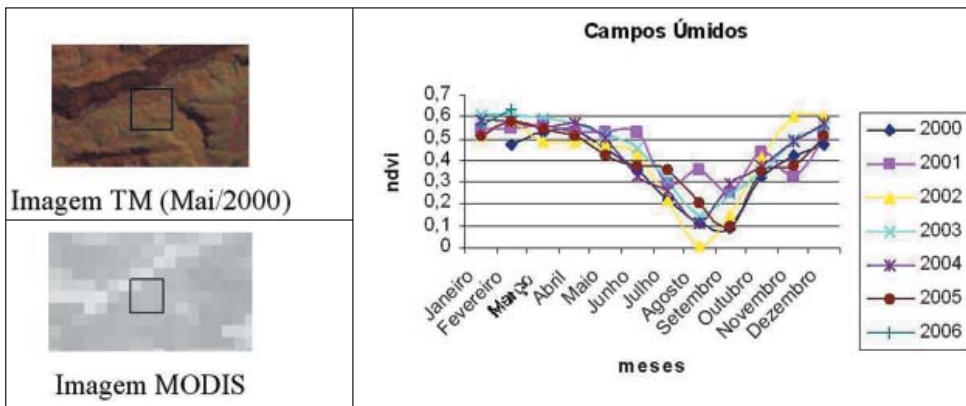


Figura 4 – Variação de NDVI em área de Campos Úmidos, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels)



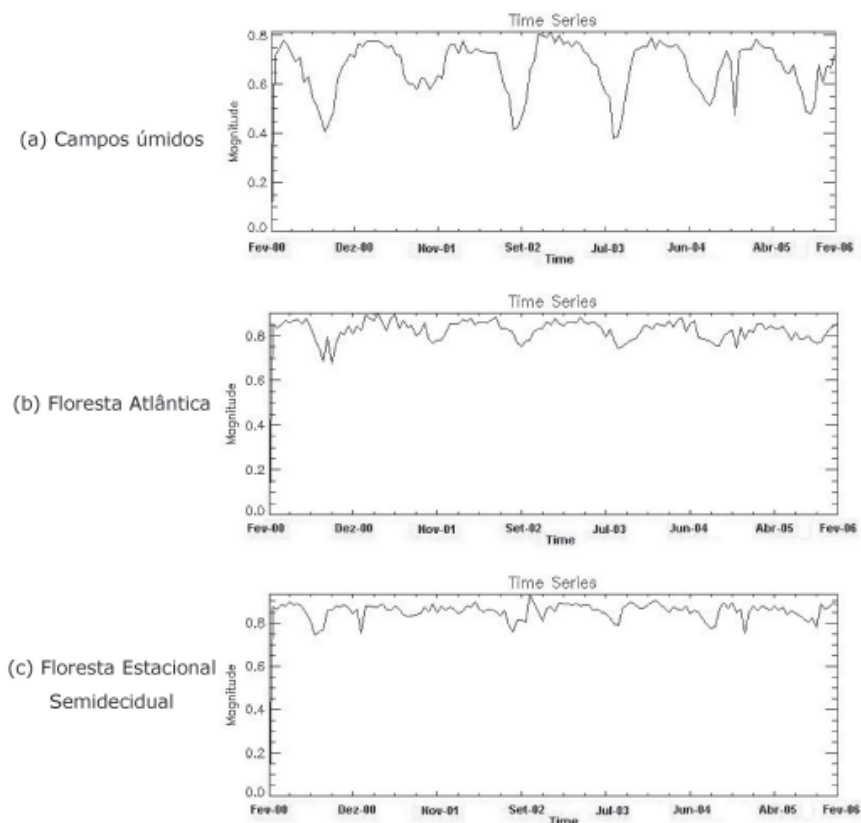
## RESULTADOS

Com a aplicação da Transformada de Ondaletas às amostras, foram gerados os resultados apresentados a seguir: a série temporal, os harmônicos e o escalograma de magnitude de cada uma das áreas.

### *Séries temporais*

A série temporal de NDVI gerada pelo aplicativo *ondaletas* nada mais é do que a representação da variação do NDVI no tempo. As séries temporais das amostras são apresentadas com o intuito de facilitar a compreensão dos diagramas de harmônicos e dos espectros de magnitude gerados pela transformada de Ondaletas.

Em termos de amplitude do NDVI, a variabilidade é mais significativa em Campos Úmidos (figura 5a), onde se observa também uma acentuada sazonalidade. Nos demais locais a sazonalidade embora presente, não é tão perceptível. De modo geral, uma análise subjetiva dessas séries temporais não possibilita a identificação dos diversos ciclos de variabilidade presentes na série temporal dos tipos de vegetação estudados.



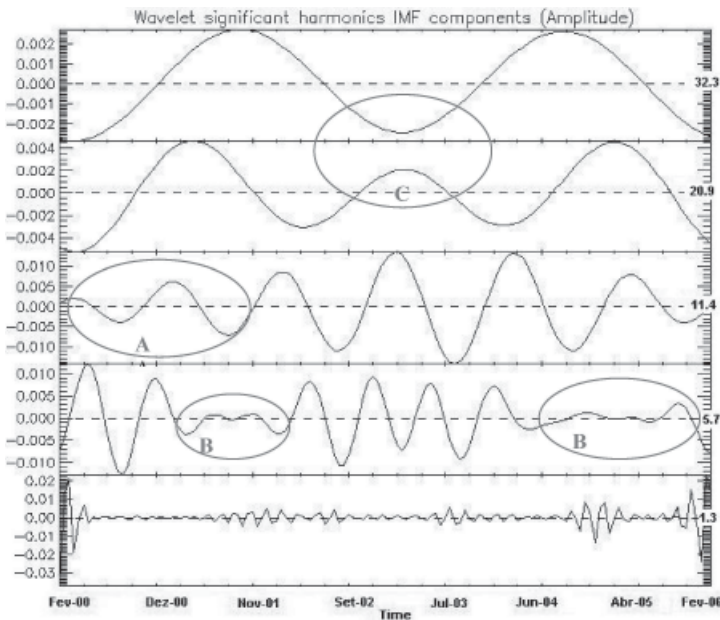
**Figura 5 - Séries temporais (tempo X magnitude do NDVI) do período de fevereiro-2000 a fevereiro-2006: (a) Campos Úmidos; (b) Floresta Atlântica; (c) Floresta Estacional Semidecidual**

### Análise de Resolução Múltipla (ARM)

Os diagramas das figuras 6, 7 e 8, gerados pela Transformada de Ondaletas, apresentam as séries temporais de NDVI em diferentes frequências (diferentes resoluções), ou seja, decompostas em harmônicos. Esse enfoque possibilita obter uma boa resolução temporal (com pobre resolução de frequência) em altas frequências e uma boa resolução de frequência (com pobre resolução temporal) em baixas frequências.

Nos harmônicos (componentes de diferentes frequências) gerados nas séries de NDVI das 3 amostras, observam-se nas baixas frequências (aproximadamente 20 e 30 meses) os ciclos interanuais e nas altas (entre 1 e 5 meses), os ciclos mensais e semi- anuais. O ciclo anual (aproximadamente 12 meses) é bem demarcado em todas as amostras.

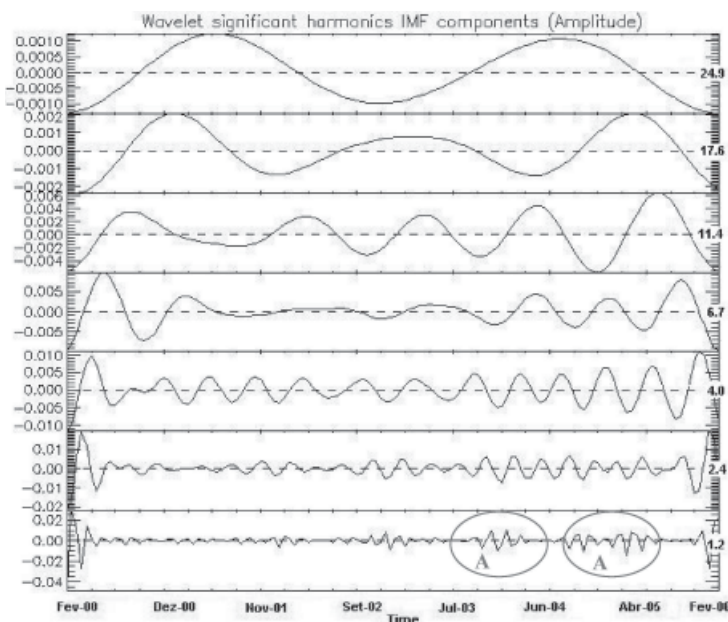
No caso de Campos Úmidos (figura 6), o ciclo anual (período de aproximadamente 11,5 meses) é bem definido, mas sofre uma diminuição de amplitude principalmente no ano de 2000 (A). Ao observar o harmônico correspondente à escala semi-anual (5,7 meses) ficam evidentes dois períodos (2001 e 2005) em que a amplitude do NDVI é muito pequena (B). Essa característica pode estar relacionada aos fenômenos El Niño e La Niña ocorridos nos períodos de 2004/2005 e 2000/2006 respectivamente, embora estes tenham sido de baixa intensidade. É interessante observar a existência de um ciclo quase bi-anual (20,9 meses), cuja amplitude é maior quando a amplitude do ciclo de 32,3 meses torna-se menor (C).



**Figura 6 - Amplitude dos harmônicos de NDVI obtidos via ARM: "Campos Úmidos", período de fevereiro-2000 a fevereiro-2006**

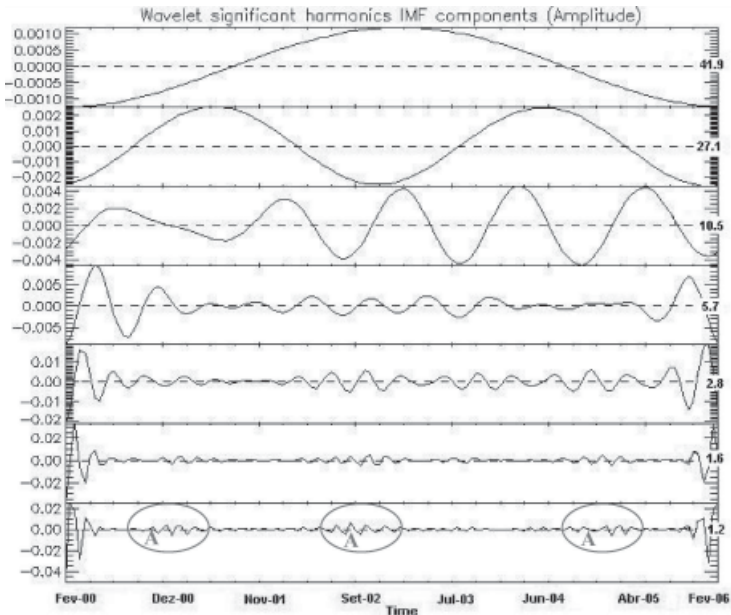
Os harmônicos associados à variabilidade temporal do NDVI da amostra de Floresta Atlântica, apresentados na figura 7, mostram a ocorrência de picos nas seguintes escalas: 1,2; 2,4; 4,0; 6,7; 11,4; 17,6; e 24,9 meses. Em termos de baixa frequência, observa-se que o ciclo semi-anual é muito fraco e que o anual, embora presente, também possui amplitude pequena. Isso se justifica pelo caráter estável e de alto vigor da vegetação da região, constituída de árvores de grande porte. Em termos de variabilidade interanual destaca-se o ciclo de aproximadamente 25 meses, possivelmente associado ao El Niño.

Nos harmônicos de alta frequência são observadas várias alterações não-periódicas na escala de 1,2 a 2,4 meses, possivelmente associadas às secas de curta duração, geadas, queimadas ou contaminação por nuvens (A).



**Figura 7- Amplitude dos harmônicos de NDVI obtidos via ARM: “Floresta Atlântica”, período de fevereiro-2000 a fevereiro-2006**

Na amostra de Floresta Estacional Semidecidual (figura 8) os harmônicos de baixa frequência, de variabilidade interanual (41,9 e 27,1 meses) denotam ciclos bem definidos. Os de alta frequência, de características não-periódicas mostram três eventos na escala mensal (A). Os harmônicos de escala anual e semi-anual são bem caracterizados, mas apresentam alterações de amplitude no período de 2000 a 2001, o que provavelmente está associado à ocorrência do evento fraco de La Niña, o que também justifica a presença do harmônico na escala de 27,1 meses. Este também é um tipo de vegetação de grande porte, que, apesar de 20% a 50% dos indivíduos perderem as folhas no inverno, apresenta valores muito altos de NDVI em todas as estações.



**Figura 8 - Amplitude dos harmônicos de NDVI obtidos via ARM: “Floresta Estacional Semidecidual”, período de fevereiro-2000 a fevereiro-2006**

### *Espectro de Magnitude da Ondaleta (Escalograma):*

O Espectro de Magnitude da Ondaleta da série de NDVI apresenta uma outra forma de representação dos resultados, no domínio tempo versus frequência. Nas figuras 9, 10 e 11, dentro do cone de influência (arco amarelo) estão as informações que têm significância estatística. No eixo “y” à esquerda, está a periodicidade mensal (em escala logarítmica). À direita está a barra de escala de potência da ondaleta, na qual os tons de amarelo a vermelho indicam as magnitudes mais altas. No eixo “x”, estão as datas (para a identificação do evento no tempo). A linha amarela representa o espectro global da ondaleta que indica em que escala temporal estão os picos de variabilidade.

Pode-se observar de forma geral um ciclo anual (entre 10 e 15 - na escala de periodicidade) bem definido em todas as amostras. O ciclo semi-anual (entre 5 e 7), embora também presente em todas as amostras, já não é tão marcante. Ciclos de menor escala foram detectados em duas das amostras analisadas, mas com baixa magnitude. Destaca-se que em alguns casos ocorrem nítidas interações/superposições de escalas, como o ciclo anual com o ciclo semi-anual e mesmo com variabilidades de frequências mais altas. Situações desse tipo indicam um impacto maior do clima na cobertura vegetal.

Parte da variabilidade observada é modulada pelas oscilações climáticas naturais, mas o tipo da cobertura vegetal é o fator primordial dessa dinâmica. Influências climáticas associadas à variabilidade interanual de períodos mais longos, tipo El Niño ou La Niña, não são detectados de forma plena, uma vez que a série temporal utilizada é relativamente pequena.

No caso das frequências mais altas, a variabilidade do NDVI mostrada poderia estar associada a mudanças eventuais das condições meteorológicas locais, como geadas ou períodos de seca.

Como observado anteriormente, a dinâmica dos Campos Úmidos é bem característica e sem grandes alterações durante o período estudado. Isso é evidente no escalograma da figura 9, no qual são demarcados apenas os ciclos anual e semi-anual, sem ocorrência de eventos não-periódicos significativos nas altas frequências. Como denotado nos harmônicos, o ciclo semi-anual é mais fraco (menor magnitude) nos anos de 2000 e 2005 (anos de El Niño e La Niña).

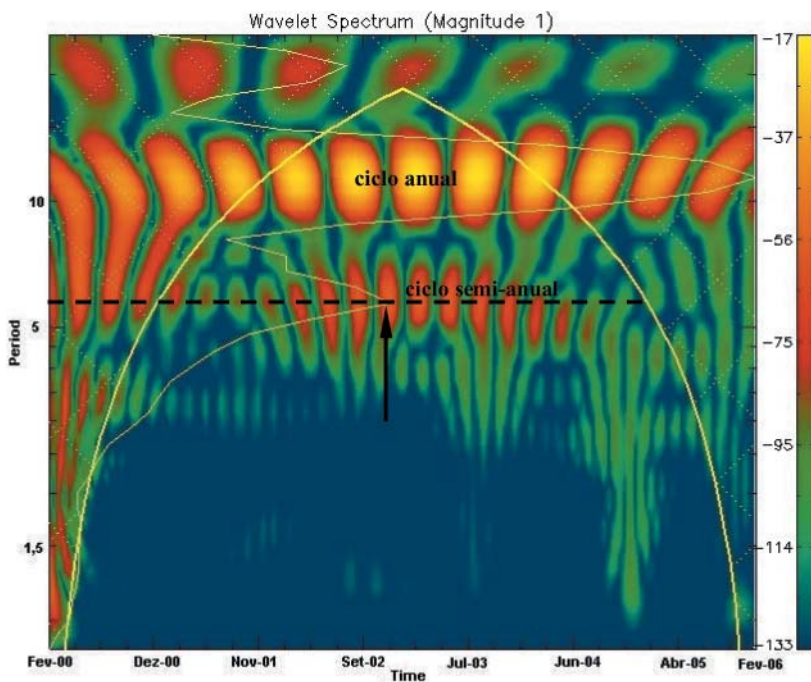
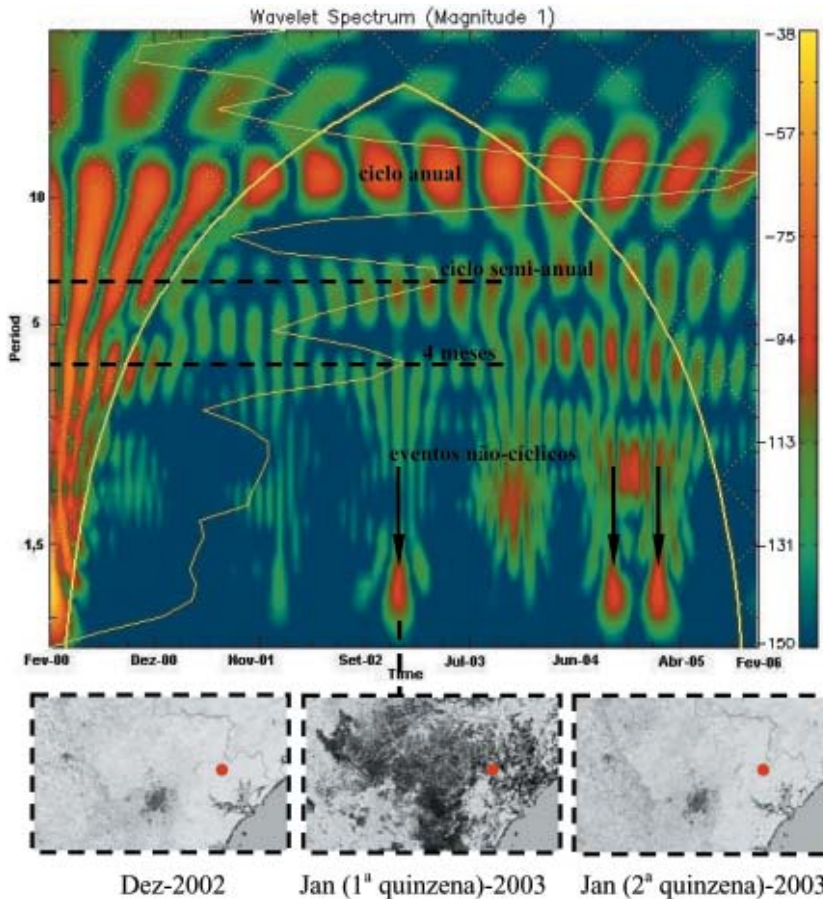


Figura 9 - Escalograma de Frequência de Ondaleta aplicada à amostra "Campos Úmidos"

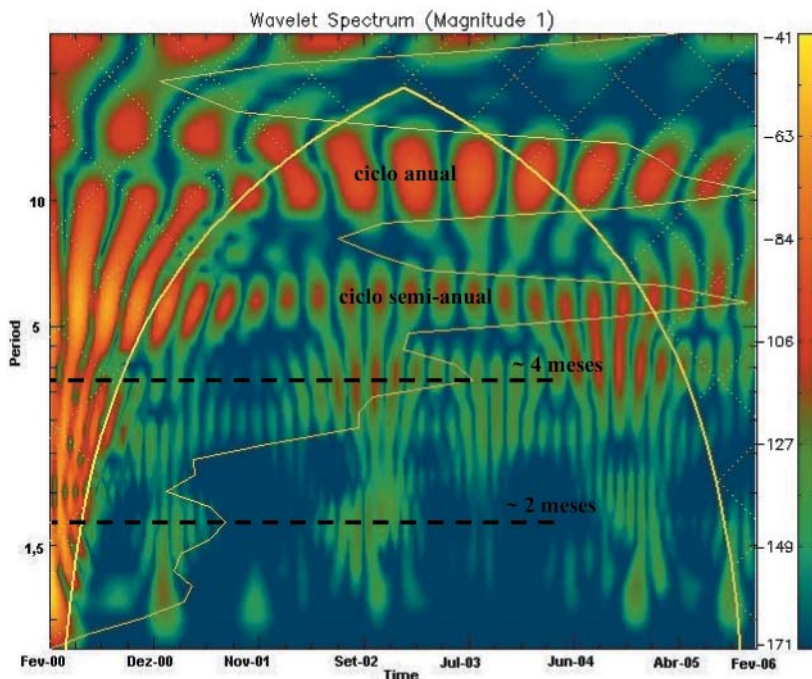
Na amostra de Floresta Atlântica nota-se o ciclo anual bem definido e o ciclo semi-anual mais fraco. Um ciclo na escala de 4 meses (principalmente a partir de 2004), é também denotado, o que pode indicar que naquele ano as estações foram mais bem definidas. Destacam-se também 3 eventos não periódicos (em Jan-03, Ago-04 e Fev-05). Neste caso, as perturbações devem-se à contaminação por nuvens. Isso pode ser observado na imagem NDVI-MODIS de Janeiro de 2003 (figura 10) e demonstra a eficiência desta técnica na identificação de eventos não-cíclicos numa série de dados.



**Figura 10 - Escalograma de Freqüência de Ondaleta aplicada à amostra "Floresta Atlântica". Evento não-cíclico: imagem do dia com nuvens, uma data anterior e uma posterior**

Na figura 11, são observadas na amostra de Floresta Estacional Semidecidual várias perturbações no NDVI em altas freqüências (escalas menores que 2 meses). As datas demarcadas no escalograma são dezembro de 2000, setembro de 2002 e fevereiro de 2005, pode-se isentar a possibilidade de terem sido causadas por incidência de nuvens, o que sugere a ocorrência de eventos não cíclicos de curta duração.

Os ciclos anual e semi-anual e sazonal (4 meses) estão presentes e há também um pico de variabilidade na escala de 2 meses, mas com baixa magnitude, e interações (ou sobreposições) entre essas escalas.



**Figura 11 - Escalograma de Freqüência de Ondaleta aplicada à amostra "Floresta Estacional Semidecidual"**

## CONCLUSÕES

A caracterização da dinâmica dos três tipos de vegetação estudados a partir das imagens NDVI/MODIS possibilitou identificar a variabilidade temporal das diferentes coberturas vegetais presentes na Região Sul do Brasil. A análise de ondaletas se mostrou promissora nesse tipo de abordagem. Apesar de ser um conjunto de apenas 6 anos de dados, os resultados obtidos sugerem que a técnica apresenta um grande potencial para detectar perturbações no comportamento padrão da vegetação frente a fenômenos climáticos não-cíclicos ou de menor escala. A manipulação dos dados com esta técnica configurou uma nova perspectiva para descrever a dinâmica de diferentes tipos de vegetação, detectar mudanças abruptas de comportamento e investigar relações com episódios climáticos locais e globais.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, E.S. **Relação entre Índice de Vegetação Derivado do NOAA-AVHRR e Precipitação na Região Amazônica**. 1997. 89p. (INPE-6390-TDI/606). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1997.
- Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E.; Aragão, L.E.O.C.; Valeriano, D.M. Monitoramento da resposta fenológica através da utilização de imagens fração derivadas do sensor MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2811-2818. 1 CD ROM.
- Arai, E.; Freitas, R.M.; Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E. Análise radiométrica de imagens MOD09 em 16 bits e 8 bits. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. **Anais...** Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 3983-3990.
- Barbieri, P.R. **Início e Fim da Estação Chuvosa na Região Sul e Sudeste do Brasil Associado com a Circulação Atmosférica na América do Sul**. 2005. 106p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.
- Barbosa, H.A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região nordeste do Brasil, em 1982-85**. 1998. 164p. (INPE-7237-TDI/690). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1998.
- Batista, G.T.; Shimabukuro, Y.E.; Lawrence, W.T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian forest region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n.15, p. 3195-3210, Jan. 1997.
- Dessay, N.; Shimabukuro, Y.E.; Batista, G.T.; Durieux, L. Dados NOAA-AVHRR para a avaliação do impacto El Niño sobre a vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 10, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Artigos, p. 1575-1578. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1. Disponível em: < <http://mar.tepeco.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.09.10/doc/1575.1578.173.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2006.
- Graps, A. An introduction to wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, v.2, n.2, p. 50-61, 1995.
- Grossman, A.; Morlet, J. Decomposition of hardy functions into square-integrable wavelets of constant shape. **SIAM J. Math. Anal.**, v. 15, p. 723-736, 1984.
- Gurgel, H.C.; Ferreira, N.J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n. 18, p. 3595-3609, 2003.
- Gurgel, H.C. **Variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil e suas conexões com o clima**. 2000. 118 p. (INPE-9655-TDI/848). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000.
- Ichii, K.; Kawabata, A.; Yamaguchi, Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982 – 1990. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.18, p.3873- 3878, 2002.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Brasil: **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004. Escala 1 : 5 000 000.
- Jacóbsen, L.O.; Fontana, D.C.; Shimabukuro, Y.E. Efeitos associados ao El Niño e La Niña na cobertura vegetal do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** CD-ROM.



Jin, S.; Sader, S.A. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 4, p. 462-470, Feb. 2005.

Kawabata, A.; Ichii, K.; Yamaguchi, Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to the temperature and precipitation. **International Journal of Remote Sensing**, v.22, n.7, p.1377- 1382, 2001.

Liu, W.T.; Massambani, O.; Festa, M. Normalized difference vegetation index for the South American continent used as a climatic variability indicator. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF REMOTE SENSING OF THE ENVIRONMENT, 24., Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro (Ann Arbor: ERIM), 1991. p. 725-732.

Moreira, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 179 p. (INPE-7528-TDI/735). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000.

Nimer, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422p.

Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, D. C. **Proceedings...** Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309- 317. (NASA SP-351).

Santos, C.A.G.; Galvão, C.O.; Suzuki, K.; Trigo, R.M. Matsuyama city rainfall data analysis using ondaleta transform. **Annual Journal of Hydraulic Engineering**, v.45, Feb. 2001.

Satyamurty, P.; Mattos, L.F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence, **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 1355-1364, 1989.

Sedano, F.; Gong, P.; Ferrão, M. Land cover assessment with MODIS imagery in southern African Miombo ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 4, p. 429-441, Oct. 2005.

Sych, R.A.; Matafonovb, G.K.; Belinskayab, A.J.; Ferreira, N.J. The periodic spatial-temporal characteristics variations of the total ozone content. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v.67, p. 1779-1785, 2005.

Wang, J.; Rich, P.M.; Price, K.P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 11, p.2345-2364, June 2003.

Yang, L.; Wylie, B.K.; Tieszen, L.L.; Reed, B.C. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. Northern and central great plains. **Remote Sensing of the Environment**, v. 65, n.1, p. 25-37, 1998.

Recebido em junho de 2008

Aceito em janeiro de 2009