

ANÁLISE DA DINÂMICA DA COBERTURA VEGETAL NA REGIÃO SUL DO BRASIL A PARTIR DE DADOS MODIS/TERRA

Analysis of Vegetation Cover Dynamic in Southern Region of Brazil using MODIS/Terra Data

Roberta Rosemback¹
Nelson Jesus Ferreira²
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Jorge Conrado Conforte²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Divisão de Sensoriamento Remoto

Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

roberta@dsr.inpe.br

yosio@dsr.inpe.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

nelson@cptec.inpe.br

conrado@cptec.inpe.br

RESUMO

Este trabalho analisa a dinâmica da cobertura vegetal na Região Sul do Brasil a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) gerado pelo sistema MODIS-Terra e dados meteorológicos durante o período de Fevereiro de 2000 a Fevereiro de 2006. Foram aplicados métodos estatísticos tradicionais para a observação da variabilidade espaço-temporal e do comportamento médio da vegetação e da precipitação. Destaca-se que as coberturas e usos da terra predominantes analisados neste estudo foram: atividade agrícola, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual. Os resultados indicam que apesar do regime de chuvas ter sido quase homogêneo durante o período, a primavera mostrou-se a mais chuvosa das estações, seguida do verão, outono e inverno. Em geral na região Sul períodos secos acarretam anomalias negativas de NDVI e períodos chuvosos geram anomalias positivas. A análise das correlações entre NDVI e o transporte horizontal de umidade mostram o papel da Amazônia e do Oceano Atlântico Sudoeste. Foi possível observar comportamentos semelhantes em áreas sob domínio de tipos vegetais diferentes, como é o caso da Savana, Floresta Ombrófila Densa e Áreas de Tensão Ecológica; e Floresta Estacional Semidecidual e Decidual. A Floresta Ombrófila Mista, Estepe, e a Savana Estépica apresentam comportamento diferenciado das demais. A exploração desses dados e técnicas se mostrou válida ao fomentar novas discussões acerca da otimização dos recursos atualmente disponíveis para este tipo de análise.

Palavras-chaves: Sensoriamento Remoto, NDVI, Vegetação, Região Sul do Brasil.

ABSTRACT

This study analyses the vegetation cover dynamic in Southern Brazil using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) generated by the MODIS/Terra system and observed precipitation datasets from February 2000 to February 2006 period. Traditional statistical methods were used to observe the vegetation and precipitation space-timing variability and average behavior. Despite the even distribution of rainfall during this period, the austral spring was the rainiest season,

followed by summer, autumn and winter. The results show that in general dry periods were correlated to NDVI's negative anomalies, while wet periods led to NDVI's positive anomalies. The cross correlation analysis of NDVI and the horizontal water vapor transport show the role of Amazon Basin and the SW Atlantic Ocean. The main observed uses and prevailing vegetation coverage types were: agriculture areas, Tropical Mixed Ombrophilous Forest, Deciduous Seasonal Forest, and Semideciduous Seasonal Forest. Similar behaviors occurred in different vegetation types such as Savanna, Tropical Close Ombrophilous Forest and Ecotones areas, as well as Semideciduous Seasonal Forest and Deciduous Seasonal Forest. Tropical Mixed Ombrophilous Forest, Steppe Savanna, and Arboreous Savanna presented a particularly unique behavior. The use of NDVI MODIS data and proposed methodology provided insight into optimization of the available resources for this kind of study.

Keywords: Remote Sensing, NDVI, Vegetation, Southern Brazil

1. INTRODUÇÃO

No bojo das pesquisas relacionadas ao uso e cobertura da terra, a dinâmica das comunidades vegetais vem sendo um tema muito explorado. Isso se deve ao fato de que através da observação do comportamento de cada ecossistema é possível inferir seus atributos funcionais e biofísicos, produção primária bruta e biomassa (YANG *et al.*, 1998). Também importante na observação dos ciclos vegetais é a determinação do começo da estação de crescimento, o pico de desenvolvimento das plantas e suas características sazonais.

É amplamente aceito, hoje, que o comportamento de diferentes tipos de vegetação seja modulado pelo clima (LIU *et al.*, 1991; BATISTA *et al.*, 1997; BARBOSA, 1998; DESSAY *et al.*, 2001; WANG *et al.*, 2003) e que a participação da vegetação no equilíbrio dos processos atmosféricos e na manutenção da temperatura é expressiva devido a evapotranspiração que promove (CONTI e FURLAN, 2003).

O crescente interesse na relação entre a resposta da vegetação e diferentes variáveis climáticas como temperatura e precipitação (POTTER e BROOKS, 1998; ICHII *et al.*, 2002; GURGEL e FERREIRA, 2003) e de como a variabilidade do clima (sazonal, anual e interanual) influi nas diversas comunidades vegetais, se justifica pelas aplicações em modelagem climática, previsão de tempo e na estimativa da produção agrícola (GURGEL, 2000). Além disso, são relações importantes nas análises dos impactos causados por diferentes mudanças no uso e cobertura da terra, como o desmatamento, queimadas e expansão da área urbana e da atividade agropecuária.

A visão sinótica proporcionada pelas imagens de satélite, aliada às diversas resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas dos sensores disponíveis, têm permitido a compreensão de processos climáticos dinâmicos (CARVALHO *et al.*, 2004; CINTRA *et al.*, 2005), a classificação de diferentes coberturas vegetais, bem como seu monitoramento (inclusive em tempo real) (ORNELAS DE ANDA *et al.*, 1992; STONE *et al.*, 1994; ANDERSON *et al.*, 2005; FROHN e HAO, 2006).

No que se refere à classificação e monitoramento da cobertura vegetal, índices de vegetação aplicados a dados

de sensoriamento remoto têm sido utilizados há quase duas décadas (ALMEIDA, 1997; JIN e SADER, 2005; SEDANO *et al.*, 2005). Desde o primeiro índice desenvolvido com o intuito de melhorar a caracterização das diferentes comunidades vegetais (JORDAN, 1969), outros têm sido adaptados a fim de minimizar as diferenças sazonais do ângulo solar e os efeitos atmosféricos (ROUSE *et al.*, 1973; KAUTH e THOMAS, 1976; RICHARDSON e WIEGAND, 1977; CLEVERS, 1988; PINTY e VERSTRAETE, 1992), e diminuir a interferência dos demais alvos que compõem um pixel (HUETE, 1988; BARET *et al.*, 1989; RONDEAUX *et al.*, 1996). Embora tais índices ainda apresentem limitações, como instabilidades e saturação, muitos trabalhos demonstram resultados positivos quanto a sua aplicabilidade.

O NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)/AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) foi o primeiro programa a fornecer dados de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) de forma sistemática. Hoje constitui uma série longa, que engloba mais de 20 anos. Contudo, desde 2000 o NDVI gerado pelo MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tem sido mais utilizado por apresentar melhor resolução espacial, correção atmosférica aprimorada e georreferenciamento mais preciso. Além disso, o MODIS oferece um contraste melhor e sofre menos influência atmosférica por possuir a banda do infravermelho próximo mais estreita e melhor posicionada que outros sensores (MOREIRA, 2000).

Especificamente em análises da conexão entre a cobertura de vegetação e a variabilidade climática, ao relacionar NDVI a dados meteorológicos, a correlação é confirmada em diversas regiões do planeta, o que demonstra a eficiência destes para tais observações (KAWABATA *et al.*, 2001; ICHII *et al.*, 2002). A resolução espacial também se mostra compatível à magnitude dos processos analisados, e a resolução temporal das séries disponíveis, suficientes para tal aplicação.

Ao considerar o território brasileiro em toda sua extensão, depara-se com uma cobertura vegetal muito diversificada e diferenças importantes referentes ao clima de cada região. Os eventos de influências globais, como

El Niño e *La Niña*, por exemplo, atuam de forma inversa no regime de chuvas no norte e no sul do país. Biomas como a Amazônia e a Mata Atlântica têm sido amplamente investigados, porém os estudos realizados sobre a influência do clima na vegetação da Região Sul são ainda muito pontuais ou voltados para a agricultura.

A Região Sul é formada pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e ocupa 6,75% do território brasileiro. Estão presentes nesta Região a Floresta Ombrófila Mista e Densa, Floresta Estacional Semidecídua e Decídua, Savana, Estepe, Savana Estépica e Formações Pioneiras com influências marinha e fluviomarinha (IBGE, 2004).

Embora a grande maioria dos trabalhos nesta área tenha utilizado dados NOAA e obtido bons resultados, a resolução espacial do sensor AVHRR (~1 km) apresenta limitações no que se refere à caracterização da variabilidade temporal e espacial da vegetação. A utilização dos dados MODIS, de resolução moderada (250m X 250m), vem aprimorar o que tem sido feito. A série de dados que disponibiliza é de apenas 6 anos, mas já permite inferir características associadas à variabilidade temporal.

Nesse contexto, é de interesse científico aprimorar o conhecimento das conexões entre clima e cobertura vegetal nesta região, uma vez que estas estão intrinsecamente ligadas à produtividade agrícola e dão suporte à modelagem do sistema biosfera-atmosfera.

2. OBJETIVOS

Este trabalho parte da premissa de que cada comunidade vegetal tem uma dinâmica temporal característica, e portanto responde de forma distinta a mudanças no padrão climático. O objetivo principal foca a observação da variação sazonal das diferentes coberturas vegetais presentes na Região Sul, a identificação de anomalias no comportamento médio e, por fim, a avaliação do potencial do produto MOD-13 (que contém os índices de vegetação providos pelo sistema MODIS-Terra) para esta aplicação.

A partir de então se investiga a possível correlação entre o comportamento do NDVI (variável representante da vegetação) e do clima em escala regional. Para tanto são utilizadas séries temporais de variáveis climáticas obtidas de estações meteorológicas e por sensores remotos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde a Região Sul do Brasil, que compreende os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 1). São aproximadamente 577.214 km² localizados entre os

paralelos 22°06' e 33°38' de latitude Sul e os meridianos 57°25' e 47°19' de longitude Oeste de Greenwich. Esta região foi escolhida devido ao clima característico, ao conhecimento de sua cobertura vegetal e principalmente devido ao fato de que os efeitos de *El Niño* e *La Niña* na Região Sul são inversos aos que ocorrem nas Regiões Norte e Nordeste do Brasil, nas quais está centrada a maioria dos trabalhos nesta linha.

Foram também selecionadas amostras de alguns tipos de vegetação, para uma análise mais pontual. Com o objetivo de observar a dinâmica da cobertura (e não do uso) da terra, essas amostras, de 3 X 3 pixels, encontram-se em áreas de proteção ambiental para isentar a possibilidade de intervenções antrópicas durante o período do estudo.

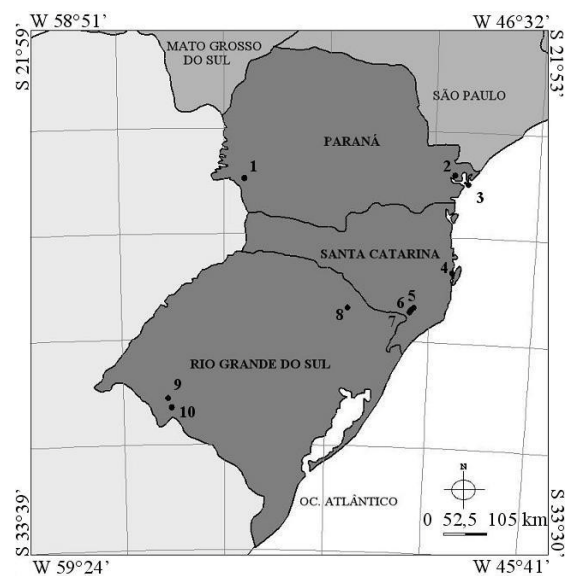


Fig.1 - Área de estudo: Região Sul do Brasil. Amostras: (1) Floresta Estacional Semidecidual; (2) Floresta Ombrófila Densa; (3) Floresta de Transição; (4) Floresta Ombrófila Densa; (5) Campos Úmidos; (6) Campos Secos; (7) Floresta Ombrófila Mista; (8) Floresta Ombrófila Mista; (9) Mata Ciliar; (10) Estepe

3.1.1 Clima e Vegetação da Região Sul

O clima na Região Sul do Brasil é privilegiado no que diz respeito ao regime anual de precipitação, cuja média varia de 1.250 mm a 2.000 mm. A distribuição espacial de chuvas se faz 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.

Sendo o ritmo sazonal da precipitação da Região Sul homogêneo, não há estação chuvosa ou seca tão bem definida quanto em outras regiões do país. O máximo e o mínimo de chuvas podem ser verificados em qualquer

estação do ano. Contudo, tal característica é fundamentada em valores e condições médias de um longo período de sucessivos anos, portanto não deve ser interpretada como uma realidade de cada ano (BARBIERI, 2005).

O clima temperado apresenta uma importante oscilação térmica ao longo do ano. O verão é uma estação quente, com temperaturas bem mais elevadas do que no inverno. O mês de janeiro é o mais representativo do verão, e julho, do inverno. É importante ressaltar que nesta região, há pelo menos um mês com temperatura média inferior a 15°C (NIMER, 1979).

Quanto aos tipos de vegetação, no Estado do Paraná, os mais representativos são: Floresta Ombrófila Mista e Densa, Floresta Estacional Semidecidual e Savana. Em Santa Catarina destacam-se Floresta Ombrófila Mista e Densa e Savana. No Rio Grande do Sul estão presentes Floresta Estacional Semidecidual e Decidual, Floresta Ombrófila Mista e Densa, Estepe, Savana Estépica e ainda Formações Pioneiras com influência marinha ou fluviomarinha (IBGE, 2004).

O IBGE (2004) as descreve como:

- Estepe (Campanha Gaúcha): composta por vegetação predominantemente campestre. Apesar do regime de chuvas manter-se homogêneo durante o ano, as plantas estão submetidas à dupla estacionalidade, uma fisiológica, provocada pelas frentes polares, e outra seca, mais curta, com déficit hídrico.
- Floresta Ombrófila Mista: também é denominada Floresta de Araucária, pela presença predominante desta espécie. Ocorre em áreas elevadas das Serras do Mar e Mantiqueira, onde a temperatura média é 18°C e nos meses mais frios é inferior a 15°C.
- Floresta Estacional Semidecidual: é submetida a dois climas, um tropical, com época de intensas chuvas de verão seguidas por estiagens acentuadas; e outro subtropical, 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.
- Floresta Estacional Decidual: é caracterizada por responder a duas estações distintas, uma chuvosa e uma seca. No prolongado período seco, mais de 50% dos indivíduos perdem as folhas.
- 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.
- Formações Pioneiras: são compostas por árvores espaçadas e estrato arbustivo pouco denso. Nos locais de ocorrência a temperatura média varia entre 24°C e 25°C, e o período de seca entre 2 a 4 meses.
- Savana (Cerrado): são formações campestres, com vegetação gramíneo-lenhosa baixa, com pequenas árvores isoladas, capões florestados e galerias florestais ao longo dos rios, ou seja, há grandes diferenças em porte e

densidade. Ocorre tanto sob climas estacionais tropicais (período de seca de 3 a 7 meses), como sob climas sem período seco.

- Savana Estépica: as espécies são predominantemente gramíneas e há presença de várias cactáceas.

3.2 Dados

Para o estudo da variabilidade espaço-temporal da vegetação e das relações desta com o clima foram utilizados os seguintes dados: imagens NDVI MODIS (produto MOD-13), precipitação observada na Região Sul, umidade do ar e vetor vento (transporte horizontal de umidade).

3.2.1 NDVI MODIS

O Índice de Vegetação é uma técnica de processamento de imagens que visa otimizar a exploração dos dados de sensores remotos. É dado pela razão entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Trata-se de um artifício matemático que utiliza a refletância dos alvos nessas faixas espectrais a fim de se obter um produto no qual a resposta da vegetação é ressaltada. Isto é possível pois a vegetação apresenta refletância baixa na faixa do visível (em função da absorção da radiação eletromagnética pelos pigmentos fotossinteticamente ativos da folha) e alta na do infravermelho próximo (devido ao espalhamento da radiação eletromagnética na estrutura interna da folha) (MOREIRA, 2000).

Com o objetivo de eliminar diferenças sazonais do ângulo do sol e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica, ROUSE *et al.* (1973) propuseram a normalização com a qual os valores obtidos são contidos em uma mesma escala (adimensional) de valores, entre -1 e 1. A expressão do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é dada por:

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

Onde: ρ_{IVP} é a refletância no infravermelho próximo, e ρ_V é a refletância no vermelho.

O produto MOD-13, além do NDVI, traz outro índice de vegetação, o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), cujo cálculo inclui alguns coeficientes e a banda do azul. Optou-se neste estudo, pela utilização do NDVI por ser menos subjetivo que o EVI, e pelo número de trabalhos já realizados com o NDVI, que vem sendo disponibilizado sistematicamente desde 1981 pelo sistema NOAA.

Os dados NDVI MODIS foram obtidos junto a EOS (*Earth Observing System*) nos EUA. Foram

utilizadas composições de dezesseis dias do período de Fevereiro de 2000 a Fevereiro de 2006 (144 datas).

Para o recobrimento de toda a área de estudo foram necessários dois *tiles* (cenas de 1200km X 1200km). No caso, o *tile* H-13/V-11 e o *tile* H-13/V-12. Ao todo, portanto, foram utilizadas 288 composições para a análise do período proposto (6 anos).

As composições de NDVI são geradas utilizando-se a função de refletância bidirecional (BRDF) de Walthall quando o número de imagens sem nuvens do conjunto de 16 é maior que 5. Os parâmetros desta função são utilizados para normalizar e interpolar a refletância de superfície no ângulo de visada ao nadir. Quando o número de imagens sem nuvens é menor que 5, é utilizado o modelo CV-MVC (*Constraint View angle Maximum Value Composite*), através do qual são registrados os maiores valores de NDVI da série para um determinado pixel. Assim, fatores como nebulosidade, variações do ângulo de iluminação e geometria de visada, vapor de água, aerossóis etc., são minimizados.

A resolução espacial do produto utilizado é de 250m X 250m. A aquisição de dados MODIS é originalmente feita em 12 bits. As imagens, depois de processadas, são armazenadas e disponibilizadas ao usuário em 16 bits, no formato HDF. Através do aplicativo NASA-MRT (*Modis Reprojection Tool*), as composições foram convertidas ao formato GEOTIFF, mosaicadas, recortadas e tiveram a projeção alterada para as adequações do estudo e dos recursos computacionais.

Os valores dos pixels da imagem NDVI, neste estágio, variam em números inteiros. A resolução radiométrica das imagens foi convertida de 16 para 8 bits por meio do 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).

3.2.2 Dados meteorológicos

Os dados de precipitação para a Região Sul do Brasil foram obtidos junto ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), em uma grade de resolução de 30'. O CPTEC incorpora nesta base os dados da rede INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e dados das PCD's (Plataforma de Coleta de Dados) mantidas pelo INPE. Foram utilizados os valores de precipitação para toda a área e também somente nas coordenadas correspondentes a cada amostra.

As variáveis umidade específica do ar e vetor vento (componentes zonal e meridional), em pontos de grade para o período de estudo, são derivadas do modelo de previsão numérica de tempo NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*) (KALNAY *et al.*, 1996).

O Transporte Horizontal de Umidade foi obtido utilizando-se a formulação:

$$\vec{Q} = q \cdot \vec{V} \quad (2)$$

Onde: q é a umidade específica (razão entre a massa de vapor e a massa total de ar em g/kg), e \vec{V} é o vetor vento horizontal (nas componentes zonal e meridional).

Esses dados estão organizados em pontos de grade de 2°30' de longitude e latitude em vários níveis isobáricos. Optou-se pelo nível de 850 hPa por ser um nível bem representativo dos transportes horizontais de umidade na baixa troposfera.

3.3 Métodos

Para a análise pretendida foram utilizadas algumas ferramentas estatísticas, gerados histogramas temporais, e levantados os eventos climáticos de influências regionais e globais mais significativos dentro do período de estudo. A metodologia está resumida no fluxograma da Figura 2:

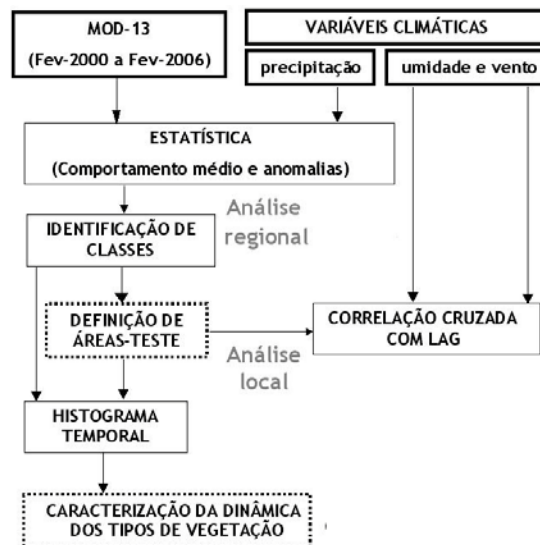


Fig.2 - Fluxograma da metodologia.

Foram calculadas para toda a área, a média sazonal e a anomalia normalizada de NDVI e de precipitação com a finalidade de compreender o comportamento médio dessas variáveis ao longo dos anos e das estações. A manipulação dos dados de NDVI foi feita no software IDL 6.3 (*Interactive Data Language*), e dos dados de precipitação, no software GrADS (*Grid Analysis and Display System*), muito utilizado em meteorologia por tratar os dados em pontos de grade.

Com o intuito de avaliar a variabilidade temporal da cobertura vegetal e identificar possíveis anomalias de comportamento foram gerados histogramas temporais do ano de 2005 (para as classes definidas pelo IBGE), e para

todos os anos do período estudado (somente para as amostras). Estes histogramas representam a variação temporal da média de um conjunto de pixels correspondentes a um determinado alvo.

Para identificar possíveis conexões entre NDVI e variáveis meteorológicas regionais e globais no sul do Brasil, foi calculada a correlação cruzada com *lag* (equação 3), ou seja, com defasagem de meses, da série temporal de NDVI das amostras com o Transporte Horizontal de Umidade.

$$R_{(x,y,L)} = \frac{\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_{i+j} - \bar{y}_{i+j})}{\left[\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \bar{x}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^{n-j} (y_{i+j} - \bar{y}_{i+j})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Onde:

L - representa os *lags*;

x e y - representam as variáveis;

\bar{x} - representa a média da variável x;

\bar{y} - representa a média da variável y;

i e j - representam os limites.

Por fim foi aplicado o teste t-Student (equação 4), para avaliar a significância estatística das correlações calculadas entre NDVI e as variáveis meteorológicas.

$$t = \frac{x - 1}{s} \sqrt{N - 1} \quad (4)$$

Onde:

x - é a média amostral;

s - é o desvio padrão da amostra;

N - é o número de graus de liberdade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Sazonalidade de Precipitação na Região Sul

A Região Sul do Brasil situa-se abaixo do Trópico de Capricórnio, em uma zona temperada essencialmente influenciada por sistemas meteorológicos transientes de latitudes médias. Ao observar a variabilidade da precipitação na região Sul, a partir das médias sazonais desta variável geradas para o período de estudo, a primavera destaca-se como estação mais chuvosa, seguida do verão e outono. O inverno é a estação mais seca.

Os resultados obtidos (não mostrados) confirmam que as chuvas são bem distribuídas no Rio Grande do Sul

ao longo do ano, ou seja, não existe uma estação chuvosa bem definida. Já em parte de Santa Catarina e principalmente no Paraná a variabilidade sazonal é bem caracterizada. No sul do Paraná e centro-oeste de Santa Catarina os valores relativamente elevados de chuva, principalmente na primavera, estão associados com os aglomerados convectivos de mesoescala. Estes são sistemas de instabilidade que tipicamente se originam no noroeste da Argentina e Paraguai, se deslocam pelo Sul do Brasil, sendo caracterizado por chuvas intensas, deslocamento rápido e duração de pouco mais que um dia. No leste do Paraná os elevados índices pluviométricos possivelmente estão associados com efeitos orográficos e circulação marítima (GRIMM *et al.*, 1998).

4.2 Sazonalidade de Vegetação na Região Sul

A partir das médias sazonais de NDVI, pôde-se observar uma significativa variabilidade espacial do NDVI no Sul do Brasil ao longo do ano (Figura 3). A primavera foi a estação que apresentou valores de NDVI mais baixos, evidenciando o tempo de resposta da vegetação à escassez de chuvas, já que o inverno foi a estação que apresentou menores índices pluviométricos.

Em contrapartida, é durante os meses de primavera que ocorrem os maiores índices pluviométricos, o que explica os valores de NDVI mais altos nos meses de verão. Nesta estação, como a vegetação encontra-se no auge do vigor, os valores de NDVI são altos em toda a área, portanto há pouca distinção entre as comunidades.

No outono ocorrem discrepâncias consideráveis entre os valores de média de NDVI ao longo da região. É a estação em que melhor se distinguem os diferentes grupos de vegetação.

A imagem da média de NDVI dos meses de inverno é a menos expressiva, os valores não são altos como no verão e nem tão baixos como na primavera, tampouco são observadas grandes diferenças entre as classes de vegetação. É uma estação homogênea no que diz respeito ao índice de vegetação.

Nas regiões de intensa atividade agrícola, nas quais as culturas têm ciclos definidos de plantio, a dinâmica da vegetação é bastante perceptível, mas trata-se de um comportamento bastante peculiar. No Estado do Paraná, por exemplo, o que fica mais evidente nas imagens é a área classificada como Floresta Estacional Semidecidual de Vegetação Secundária (NO do Estado). Além deste tipo de vegetação perder as folhas no período seco ou frio (o que pode permitir que o efeito do solo influa na resposta), esta é uma área onde a atividade agropecuária é forte (A). Nesta área os valores de NDVI são mais baixos do que em outras localidades do Estado, principalmente na primavera.

Durante a primavera e o outono, destaca-se também a região do Planalto de Ponta Grossa, ou Campos Gerais (B), no Paraná, com valores de NDVI muito

baixos. Nessa região a cobertura vegetal é composta por campos nativos, Floresta Ombrófila Mista (Mata de Araucária) e grandes reflorestamentos de Pinus.

Em Santa Catarina, as imagens de média de inverno e primavera são as que mais evidenciam as diferenças entre tipos de cobertura. No sul do Estado, destaca-se a Mata de Araucária na Serra Geral (C), de NDVI quase saturado em todas as estações.

No Rio Grande do Sul, a Floresta Estacional Decidual (D) apresenta valores de NDVI próximos ao máximo em todas as estações. Como no Paraná, esse Estado possui uma extensa área no norte de seu território tomada por atividades agrícolas, principalmente culturas de arroz e soja. O comportamento da cobertura vegetal

nesta região é bem peculiar e distinta do restante do Estado, os valores de NDVI caem drasticamente na primavera (E), época de colheita e preparo de solo.

Ficam evidentes nas imagens de NDVI a distinção de grandes áreas de drenagem, como as Lagoas Mangueira, Mirim, e dos Patos, e a Represa Passo Real, no RS, e o Rio Paraná, no PR. Também são bem distintos os grandes centros urbanos, como Curitiba e Porto Alegre.

A Floresta Estacional Semidecidual, presente no Parque Nacional do Iguaçu no PR (F), é alvo claramente identificável em qualquer estação, pois essa floresta apresenta os maiores valores de NDVI da região.

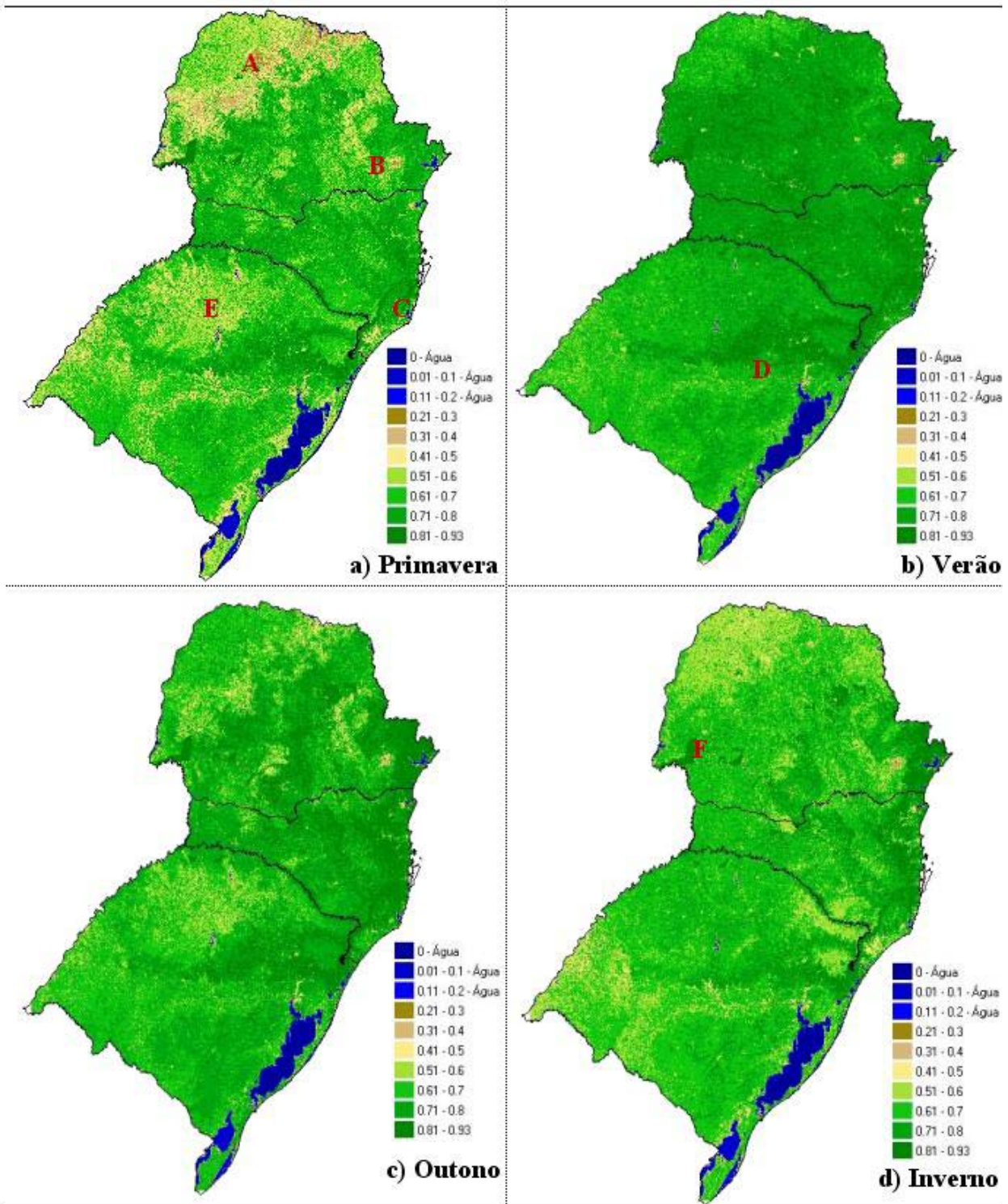


Fig.3 - Variabilidade Sazonal do NDVI na Região Sul do Brasil durante o período de fevereiro de 2000 a fevereiro de 2006, derivada do MOD-13, resolução 250 m: a) Primavera, b) Verão, c) Outono, d) Inverno.

4.3 Transporte Horizontal de Umidade (THU) X Vegetação

A partir dos resultados das médias sazonais (de NDVI e precipitação) que sugeriram que a vegetação responde à precipitação com defasagem de uma estação (ou seja, a média de 3 meses), partiu-se para uma análise em macroescala, na qual foi utilizada o Transporte Horizontal de Umidade (THU), que é uma das componentes-chaves do ciclo hidrológico regional. A observação desta variável permite o diagnóstico de fontes ou sumidouros de vapor de água.

A correlação entre a série temporal de NDVI e a de THU foi feita para todas as amostras, mas serão apresentados apenas os resultados da amostra de Estepe como representativa do que ocorre nas demais áreas. Os diagramas mostram os vetores de correlação de THU na América do Sul e vizinhança, em 850 hPa, e a correlação entre a série temporal destes e das amostra de vegetação. A Figura 4 mostra a correlação simultânea, na Figura 5 há defasagem de um mês e de dois meses na Figura 6.

Em $t = 0$ (correlação simultânea) observa-se que a resposta espectral da Estepe (expressa em valores de NDVI) está principalmente correlacionada ao THU oriundo de Noroeste (máximo sobre o Paraguai e Bolívia). Isso alude à importância da Amazônia como uma das fontes de vapor de água para a Região Sul, pois além desta, apenas a região do Atlântico Equatorial apresenta correlação significativa com o NDVI.

Para $t = -1$ (defasagem de um mês) o NDVI da amostra está relacionado com o THU relativamente forte vindo do Nordeste (Oceano Atlântico e Amazônia) e Noroeste (Brasil Central). Apresenta também correlação moderada com o THU do Atlântico Sudeste.

Já em $t = -2$ (defasagem de dois meses) observa-se a influência do THU vindo da direção Nordeste (Oceano Atlântico), vizinhança da costa sul, na amostra de vegetação analisada. Neste caso as correlações variam entre 0,4 e 0,5. Nesta escala de defasagem, destaca-se a contribuição sazonal do vapor de água no comportamento da cobertura vegetal.

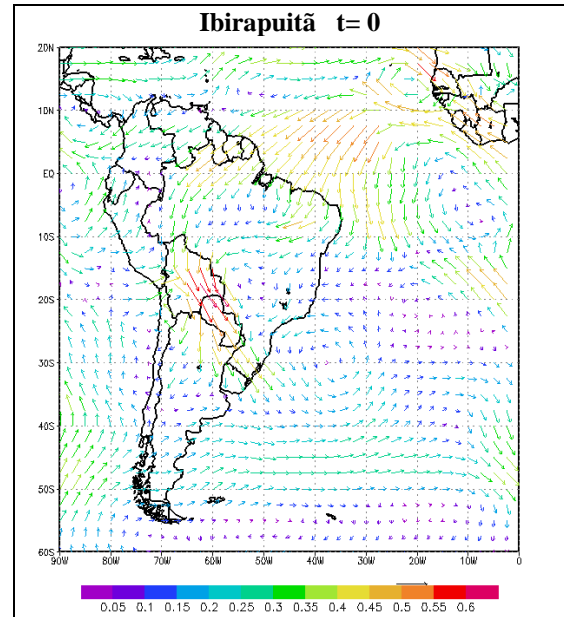


Fig. 4 – Vetores de correlação entre as séries temporais de THU e de NDVI. Amostra “Ibirapuitã” - defasagem no tempo = 0.

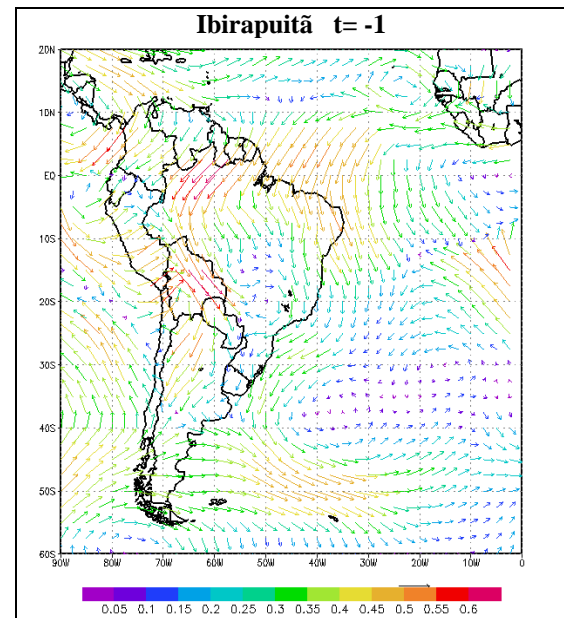


Fig. 5 – Vetores de correlação entre as séries temporais de THU e de NDVI. Amostra “Ibirapuitã” - defasagem no tempo = 1 mês.

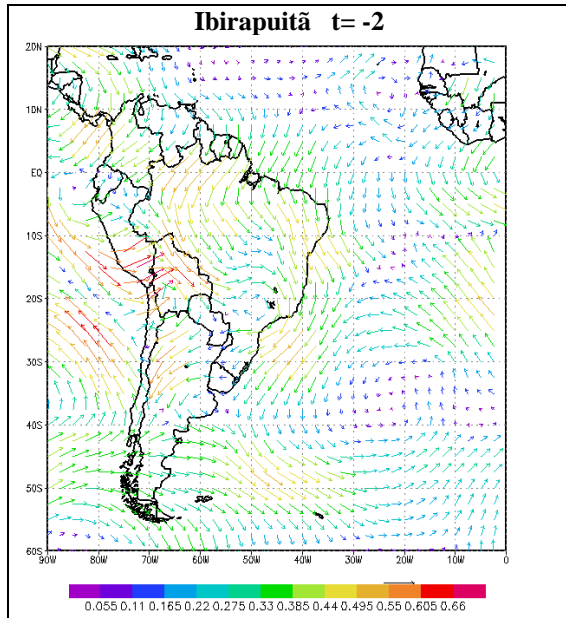


Fig. 6 – Vetores de correlação entre as séries temporais de THU e de NDVI. Amostra “Ibirapuitã” - defasagem no tempo = 2 meses.

4.4 Anomalias de precipitação e NDVI

As anomalias de cada estação (diferença entre a média da estação em cada ano e a média da estação de todo o período) foram calculadas para as variáveis NDVI e precipitação. As anomalias negativas mostraram-se mais freqüentes e de maior abrangência do que as anomalias positivas nas duas variáveis.

Os resultados, em geral, apontam que quando há ocorrência de períodos chuvosos (anomalia positiva de precipitação), acontecem anomalias positivas de NDVI na estação seguinte, assim como na seqüência de períodos secos ocorrem anomalias negativas de NDVI na estação subsequente.

O exemplo da Figura 7 (a) apresenta a anomalia de precipitação no inverno de 2002. Nota-se valores negativos na área em destaque (entre Paraná e Santa Catarina). A Figura 7 (b) é referente à anomalia calculada para o NDVI da estação seguinte, a primavera, do mesmo ano. Destaca-se, na mesma região, a anomalia negativa de NDVI.

A série temporal de 6 anos não é suficiente para efetivamente diagnosticar como a variabilidade climática interanual afeta a cobertura vegetal, até porque não ocorreu nenhum fenômeno forte de *El Niño* ou *La Niña* durante este período. É importante também colocar que a análise de médias sazonais pode ter mascarado os indícios de influência desses eventos, ou mesmo os tempos de resposta da vegetação às chuvas menores que três meses.

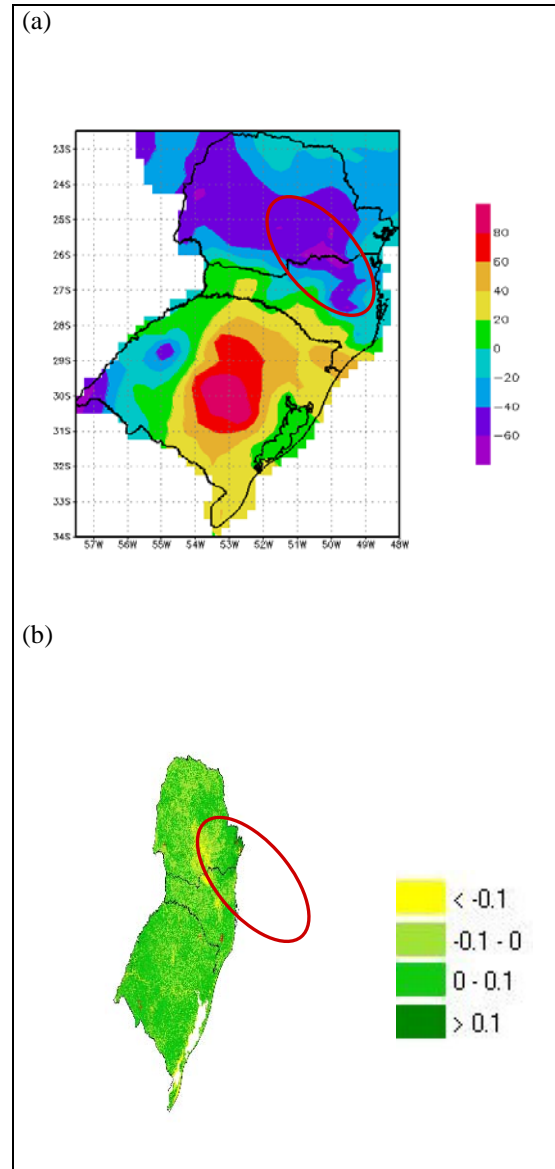


Fig. 7- (a) Anomalia de precipitação – inverno/2002 e (b) anomalia de NDVI – primavera/2002.

4.5 Histogramas temporais de NDVI – comportamento médio das classes de vegetação (IBGE) no ano de 2005

Para a observação da variabilidade temporal do NDVI na região de estudo, apresentam-se os histogramas temporais do ano de 2005 (como representativos da série histórica) gerados para os grupos de cobertura vegetal e suas classes, definidos pelo IBGE (Figuras 8, 9 e 10). Foram utilizadas imagens mensais a fim de minimizar ruídos, mas há ainda a ressalva de que as classes referem-se à provável cobertura vegetal original do território, portanto hoje abarcam diferentes alvos, já que incluem extensas áreas antropizadas.

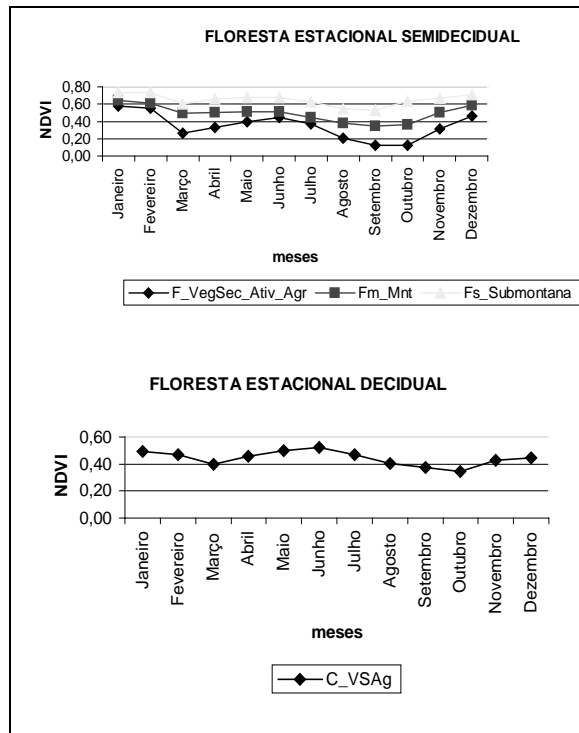


Fig. 8 - Variabilidade de NDVI durante o ano de 2005 das classes de vegetação estabelecidas pelo IBGE. Floresta Estacional Semidecidual; Floresta Estacional Decidual

É possível observar comportamentos semelhantes em tipos vegetais diferentes, como é o caso da Floresta Estacional Semidecidual e Decidual; e da Savana, Floresta Ombrófila Densa e Áreas de Tensão Ecológica. Já a Floresta Ombrófila Mista, Estepe, e a Savana Estépica apresentam comportamento característico.

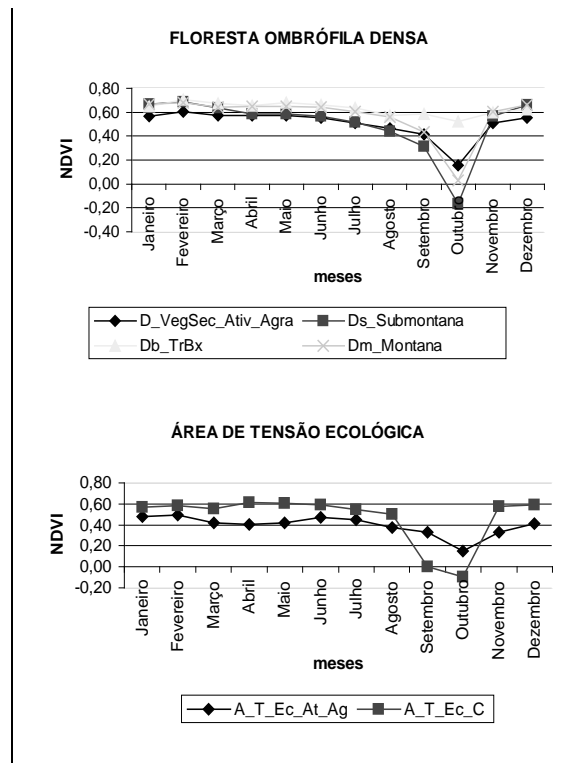
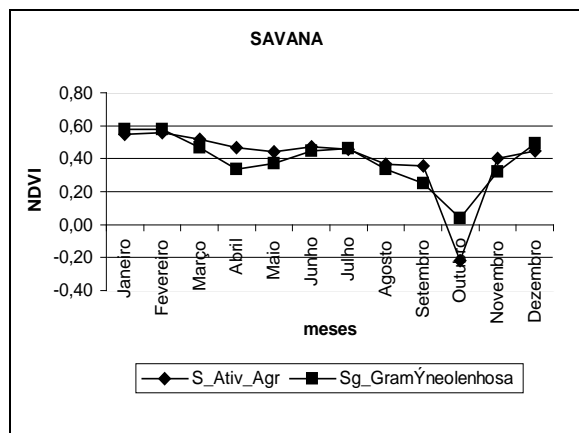


Fig. 9 - Variabilidade de NDVI durante o ano de 2005 das classes de vegetação estabelecidas pelo IBGE. Savana; Floresta Ombrófila Densa; Área de Tensão Ecológica.

Os valores de NDVI apresentados pela Floresta Estacional Semidecidual são mais altos que os apresentados pela Decidual, mas denotam-se, em ambos histogramas, duas quedas nos valores de NDVI durante o ano, uma suave entre os meses de março e abril, e outra mais intensa entre os meses de setembro e outubro.

A Savana, Floresta Ombrófila Densa e Áreas de Tensão Ecológica se assemelham pela estabilidade dos valores de NDVI durante quase todo o ano (em média, mais altos na Floresta Ombrófila Densa) e por apresentarem queda brusca destes entre os meses de outubro e novembro.

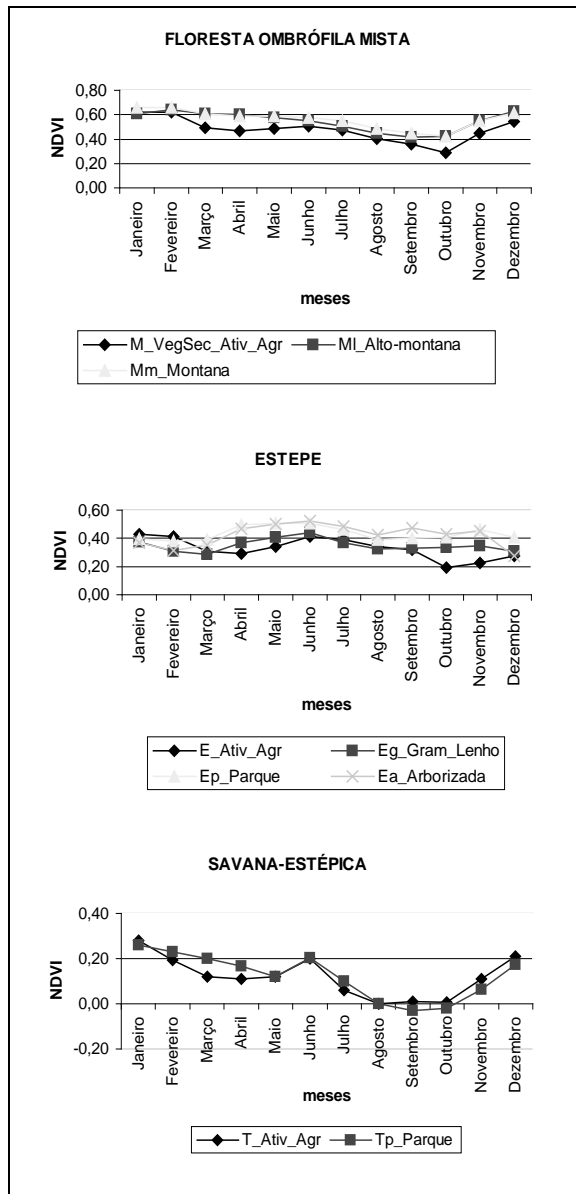


Fig. 10- Variabilidade de NDVI durante o ano de 2005 das classes de vegetação estabelecidas pelo IBGE. Floresta Ombrófila Mista; Estepe; Savana-estépica.

A Floresta Ombrófila Mista apresenta valores de NDVI quase sempre decrescentes do mês de março até outubro (de 0,4 até 0,2), quando tornam a aumentar até 0,6, como nos primeiros meses do ano. A Estepe não apresenta sazonalidade marcante. O NDVI da Savana Estépica começa o ano descendendo, apresenta um pico entre junho e julho que não chega a ser o valor máximo (que se dá em janeiro e dezembro) e volta a cair.

Em todos os histogramas, os valores de NDVI no mês de outubro são os mais baixos. Ao observar o desempenho das curvas essa queda é esperada, vem se anunciando em meses anteriores, e sugere um ponto

comum no comportamento dos diferentes tipos de vegetação. Mas é importante colocar que o sistema MODIS só dispõe de uma imagem quinzenal no mês de outubro, ao contrário dos demais meses (nos quais foram geradas imagens mensais a partir de duas quinzenais). Portanto, os valores apresentados nos meses de outubro podem estar ruidosos e subestimados em relação aos demais.

4.3 Histogramas temporais de NDVI - comportamento médio das amostras (no período de fev-2000 a fev-2006)

Os histogramas temporais das amostras abrangem todo o período de estudo e demonstram com mais especificidade a dinâmica dos tipos de vegetação selecionados.

A Floresta Estacional Semidecidual Submontana (Figura 11) apresenta valores altos de NDVI em todas as estações (entre 0,7 e 0,8), 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 na região esta cobertura vegetal apresenta uma sazonalidade provavelmente associada às quedas de temperatura do inverno.

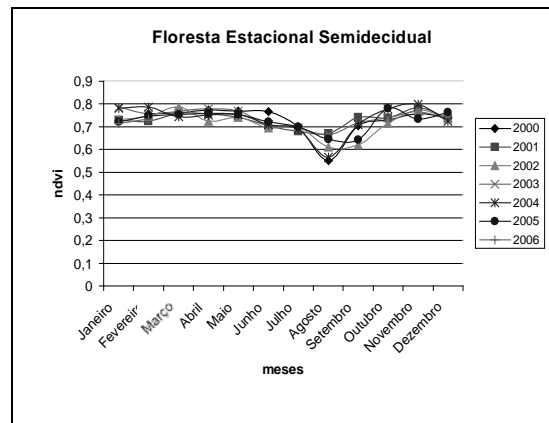


Fig. 11 - Variação de NDVI em área de Floresta Estacional Semidecidual, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

No litoral, região de Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica), onde a umidade é alta o ano todo, os valores mais altos (0,70 a 0,85) ocorrem no começo do ano, durante o verão e outono, e os mais baixos na primavera, a sazonalidade é marcada pela queda dos valores no mês de outubro (Figura 12).

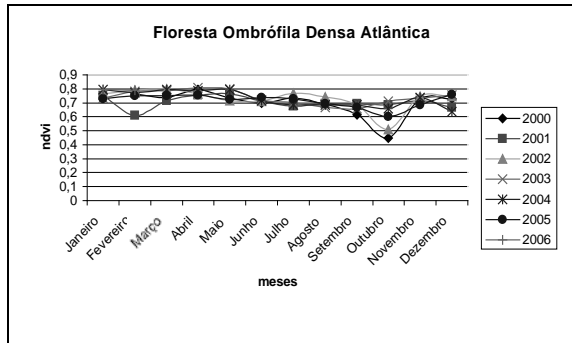


Fig. 12 - Variação de NDVI em área de de Floresta Ombrófila Densa, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

Na Floresta de Transição a sazonalidade também é fraca (Figura 13), porém, em alguns anos observa-se uma mudança abrupta de valores, como a queda em outubro de 2000 e o pico em fevereiro de 2005. Dado que houve um evento La Niña (que acarreta períodos mais secos) em 2000 e um El Niño (durante o qual há o aumento das chuvas) em 2005, esses pontos extremos podem estar relacionados a esses eventos. Aparentemente, neste caso o NDVI é mais sensível às condições de inverno que às de verão.

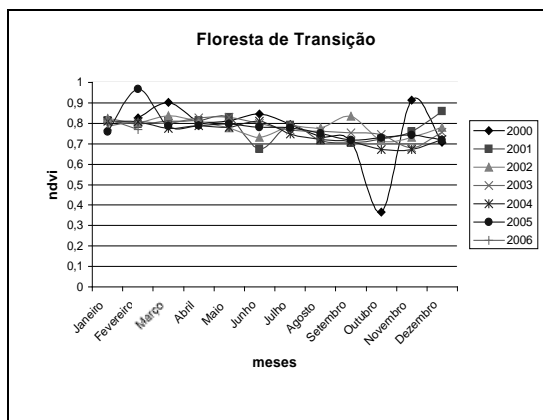


Fig.13 - Variação de NDVI em área de Floresta de Transição, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

Foram selecionadas amostras em Campos Secos, Campos Úmidos e Floresta Ombrófila Mista (Mata de Araucária). Tais amostras estão situadas numa região em que a temperatura média anual não passa dos 14°C, e onde muitas vezes há a ocorrência de neve.

Em áreas de Campos Úmidos, os valores máximos de NDVI não ultrapassam 0,7 e caem bruscamente nos meses de inverno, já em Campos Secos os valores são mais altos, com queda nos meses de inverno e primavera, com amplitude de variação de 0,6 a

0,8. Na amostra de Floresta Ombrófila Mista, o NDVI varia entre 0,5 e 0,8. A queda nos valores se dá entre agosto e novembro, porém, em setembro de 2000 e 2001 houve um aumento abrupto de valores (Figura 14).

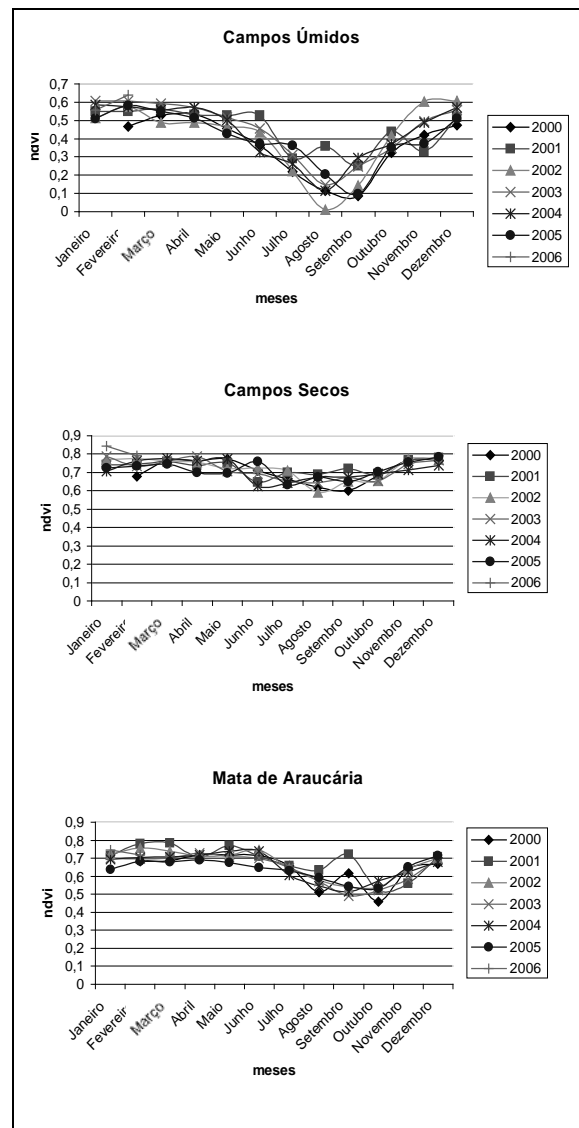


Fig. 14 - Variação de NDVI em área de Campos Secos, Campos Úmidos e Floresta Ombrófila, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

Na amostra de Mata Ciliar (Figura 15), é possível observar a instabilidade a que está sujeito este tipo de vegetação por ocupar porções de terreno passíveis de inundações. Apesar dos valores de NDVI serem em geral mais baixos em julho e agosto durante todo o período estudado, o range de variação muda sensivelmente a cada ano.

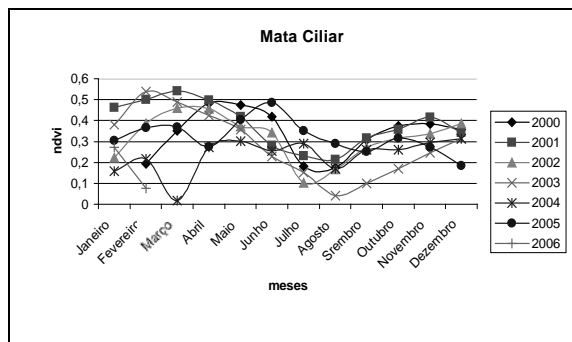


Fig. 15 - Variação de NDVI em área de Mata Ciliar, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

Nas áreas de Estepe (sudeste do RS) os valores mais baixos da média de NDVI ocorrem no final do inverno provavelmente porque nos meses desta estação as temperaturas no extremo sul são muito baixas. É uma área de sazonalidade bastante estável, nota-se que a variação é a mesma em todos os anos estudados (Figura 16).

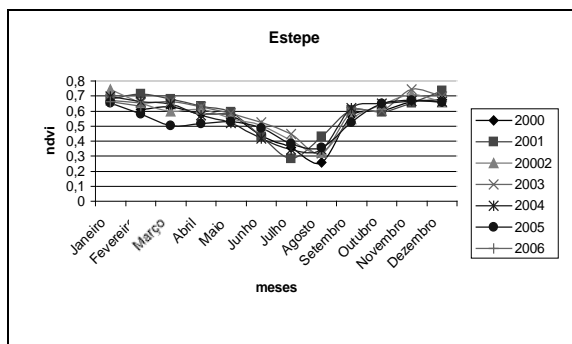


Fig. 16 - Variação de NDVI em área de Estepe, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

As regiões de Floresta Ombrófila Mista (Figura 17) são as que possuem sazonalidade mais marcante, até porque nessas áreas a variabilidade climática é mais forte, com temperatura média de 18°C e 3 a 6 meses de média inferior a 15°C.

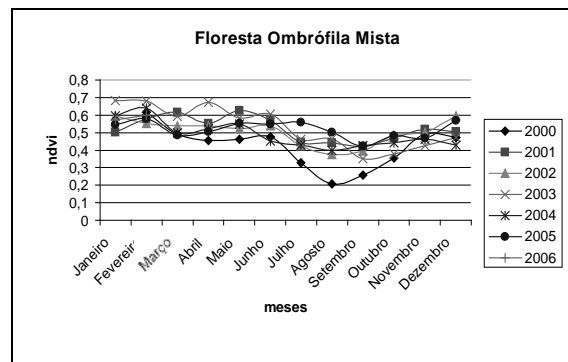


Fig.17 - Variação de NDVI em área de Floresta Ombrófila Mista, ao longo dos meses nos anos de 2000 a 2006. Gráfico gerado a partir de imagens NDVI/MODIS (amostras de 3 X 3 pixels).

5. CONCLUSÕES

As imagens NDVI do produto MOD-13, MODIS-Terra, foram eficientes na observação da variação sazonal das diferentes coberturas vegetais presentes na Região Sul e na identificação de anomalias na resposta da vegetação. A análise da correlação entre o comportamento da vegetação e variáveis climáticas em escala regional não foi abrangente ou aprofundada o suficiente para incitar proposições objetivas. Porém, a exploração desses dados e técnicas se mostrou válida, uma vez que foram fomentadas novas discussões acerca da otimização dos recursos atualmente disponíveis.

Nas amostras de 3 X 3 pixels, a partir das quais foi possível observar a sazonalidade de determinados tipos de vegetação, as variações mais finas são mascaradas pelos altos valores apresentados pelo índice de vegetação. O número de variáveis envolvidas na compreensão de determinados processos também está relacionado à escala de análise, dimensão da área e resolução dos dados disponíveis. Não foram abordadas neste trabalho, por exemplo, questões como tipo de solo, altitude ou declividade, que seriam cabíveis na análise das amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In: 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'89), **Proceedings**, Vancouver: 1989. p. 1355-1358.

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.

CARVALHO, J. C.; FERREIRA, N. J.; RAMOS, F.M. Sondagem vertical da atmosfera usando o sistema ATOVS/NOAA. In: Ferreira, N. J. (org.). **Aplicações Ambientais Brasileiras dos Satélites NOAA e TIROS-N.** São Paulo: Oficina de textos, 2004. cap. 9, p. 189-220.

CINTRA, R. S. C.; LIMA, W. F.; ESPINOZA, E. S.; VELHO, H. F. C. Inclusão de dados ATVOS no Sistema de Assimilação de Dados GPSAS do CPTEC. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2917-2924. 1 CD ROM.

CLEVERS, J. G. P. W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 1, p. 53-69, June 1988.

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.teped.com.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.09.10/doc/1575.1578.173.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2006.

FROHN, R. C.; HAO, Y. Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 3, p. 237-251, Nov. 2006.

GRAPS, A. An introduction to wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, v.2, n.2, p. 50-61, 1995.

GRIMM, A. M., S. E. T. FERREIRA e J. GOMES, 1998: Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, 11, 2863-2880.

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.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

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.
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the Forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v.77, n.3, p.437-471, 1996.
- KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. The tasselled-cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 3., West Lafayette. **Proceedings...** West Lafayette: Purdue University, 1976. p. 4B41-4B51.
- 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.
- ORNELAS DE ANDA, J. L. et al. Mapeo de la cobertura forestal de México usando imágenes AVHRR. **Revista SELPER – Special Edition ISY-WFW Conference**, v.8, n.2, 1992.
- PINTY, B.; VERSTRAETE, M. M. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. **Vegetation**, v. 101, n. 1-2, p. 15-20, 1992.
- POTTER, C. S.; BROOKS, V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 15, p.2921-2948, Oct. 1998.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 43, n. 12, p. 1541-1552, 1977.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, Feb.1996.
- 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).
- 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.
- STONE, T. A.; SCHLESINGER, P.; HOUGHTON, R. A.; WOODWELL, G. M. A map of the vegetation of South America based on satellite imagery: **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 5, p. 541-551, May 1994.
- 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 Environment**, v. 65, n.1, p. 25-37, 1998.