



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-9655-TDI/848

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO NDVI SOBRE O
BRASIL E SUAS CONEXÕES COM O CLIMA**

Helen da Costa Gurgel

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada Pelo Dr. Nelson Jesus
Ferreira, aprovada em 30 de março de 2000.

528.711.7 : 551.583

GURGEL, H. C.

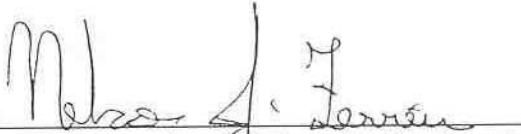
Variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil e suas conexões com o clima / H. C. Gurgel. – São José dos Campos: INPE, 2000.

118p. – (INPE-9655-TDI/848).

1.Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). 2.Clima. 3.Cobertura vegetal. 4.Análise por principais componentes. 5.AVHRR. I.Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Sensoriamento Remoto.**

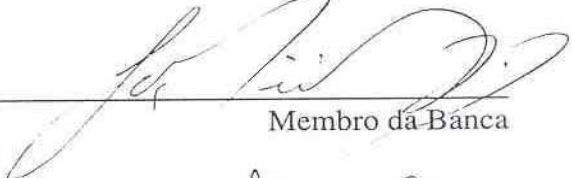
Dr. Nelson Jesus Ferreira


Orientador/Presidente

Dra Corina da Costa Freitas


Membro da Banca

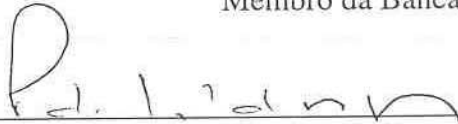
Dr. Getúlio Teixeira Batista


Membro da Banca

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Membro da Banca

Dr. Pedro Leite da Silva Dias


Membro da Banca
Convidado

Candidata: Helen da Costa Gurgel

São José dos Campos, 03 de março de 2000.

Dedico esta dissertação a minha amada mãe que tanto me ajudou para conseguir chegar a esta etapa, a meu pai, a meus irmãos Marcio e Rafa e ao Leandro e a todos aqueles que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Nelson Jesus Ferreira pelas opiniões, discussões, ensinamentos, ajuda e motivação durante todas as etapas.

Aos doutores Alberto Setzer, Clovis Angeli Sansigolo, Corina da Costa Freitas, Dalton de Morisson Valeriano, Eduardo Bastos, Getulio Texeira Batista, João Roberto dos Santos e Yosio Edemir Shimabukuro pelas sugestões e comentários.

À pós-graduação do INPE e de Sensoriamento Remoto em especial ao Dr. Flávio Jorge Ponzoni e a Maria Etelvina Arbex.

Aos colegas da meteorologia Egidio, Francisca, Isabel, Joice, Maria Valverde e Pablo pelo apoio, sugestão e amizade.

Aos colegas da DPI Ricardo Cartaxo, Júlio D'Alge e Eymar Lopes pelo o apoio e ajuda em diversas etapas deste trabalho.

Aos colegas Alfredo, Correia, Manoel, Maria Isabel, Roberto, Silvia, Sidnei e a todos os colegas da turma de mestrado em Sensoriamento Remoto pelas sugestões e amizade.

A todos os colegas do INPE que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

RESUMO

Este trabalho avalia as conexões entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e as variabilidades climáticas anual e interanual sobre o Brasil. As análises foram feitas utilizando-se NDVI e Radiação de Ondas Longas (ROL), derivados do *National Oceanic and Atmospheric Administration – Advanced Very High Resolution Radiometer* (NOAA-AVHRR). O estudo foi baseado no comportamento estatístico destes dados para o período de janeiro de 1982 a dezembro de 1993. Foram utilizadas as técnicas de estatística multivariada de análise por componentes principais (ACP) e análise de agrupamento, bem como médias mensais e sazonais e anomalias. A ACP foi aplicada nos dados de ROL e de NDVI; já a análise de agrupamento foi feita apenas nos dados de NDVI. Os resultados obtidos mostram que as médias e anomalias de ROL, assim como a ACP, possibilitaram a caracterização climática espacial e temporal dos principais sistemas de tempo que atuam sobre o Brasil. Em relação à ACP, observou-se que a primeira componente representa o padrão médio da atividade convectiva; a segunda e quarta componentes estão associadas aos modos verão/inverno e primavera/outono do ciclo anual; a terceira componente mostra as variações moduladas pelos eventos de El Niño, e; a quinta componente está associada ao ciclo semi-anual. A análise de agrupamento realizada nos dados de NDVI, identificou sete grandes grupos de vegetação que ocorrem no Brasil e revelou a variabilidade anual e interanual e o tempo de resposta a precipitação destes grupos. A ACP aplicada ao NDVI demonstrou a potencialidade desta variável em caracterizar as grandes feições da vegetação que predominam no território brasileiro. Além disso, caracterizou-se a variabilidade anual e interanual destas tipologias de vegetação relacionadas com a variabilidade climática (componentes 1, 2 e 3). A ACP também revelou os principais fatores “não climáticos”, tais como ocorrência de queimadas, mudança de horário da passagem dos satélites NOAA e trocas dos satélites NOAA 9 e 11 (componentes 4, 5, 6 e 10), que ocasionam distúrbios no NDVI. Os altos valores de correlações obtidos entre os autovetores, resultantes da ACP da ROL e do NDVI, que correspondem aos modos verão/inverno ($r = 0,91$) e primavera/outono ($r = 0,70$), indicam que a variabilidade anual da cobertura vegetal brasileira é modulada em grande parte pelo regime climático. Os resultados encontrados também sugerem que as técnicas estatísticas utilizadas neste trabalho, mostraram-se ser, interessantes ferramentas para caracterizar eventos de mudanças periódicas ou aperiódicas em dados de séries temporais obtidos através de sensoriamento remoto.

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF NDVI OVER BRAZIL AND ITS CONNECTIONS WITH THE CLIMATE

ABSTRACT

This work studies the connections between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and annual and interannual climatic variabilities over Brazil. For this purpose, NDVI and Outgoing Longwave Radiation (OLR) data, obtained from National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-AVHRR) between January/82 and December/93, were analyzed. To accomplish this study, Cluster and Principal Component Analysis (PCA) were the statistical tools used, as well as monthly and seasonal means, and annual anomalies. PCA was done at both NDVI and OLR data, in contrast to Cluster analysis, which was applied only to NDVI data. The obtained results point that the means and anomalies at OLR data and the PCA, allow a climatic characterization in space and time of the main climatic systems that act on Brazil. In relation to the PCA, it was observed that the first component represents the mean pattern of convective activity; second and fourth components are associated to the summer/winter and spring/autumn modes of the annual cycle; the third component shows the variations modulated by El Niño's events, and the fifth component is associated with the semi-annual cycle. The cluster analysis of NDVI data, sorted seven great vegetation groups that appear in Brazil and showed the annual and interannual variation, as well as these groups' response time to precipitation. The PCA of NDVI demonstrated the potentiality of this variable in characterizing the main features of vegetation that prevail in the Brazilian territory. In addition, annual and interannual variability of these vegetation groups related to the climatic variability (components 1, 2 and 3), was characterized. PCA also revealed the main "non climatic" factors that disturbs NDVI, which are: the occurrence of burns, NOAA's satellites period delays and the changes of NOAA's satellites 9 and 11 (components 4, 5, 6 and 10). The high values of correlations obtained among the eigenvectors, resultants from PCA of OLR and NDVI data, that correspond to summer/winter ($r = 0.91$) and spring/autumn ($r = 0.70$) modes, indicate that the annual variability of Brazilian vegetation cover is largely modulated by the climatic regime. The obtained results suggest that the statistical techniques used in this work, proved to be useful tools to characterize events of periodic and non-periodic changes in temporal series data collected by remote sensing.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 - Variabilidade Climática	21
2.2 - Radiação de Ondas Longas (ROL)	24
2.3 - Vegetação do Brasil	25
2.4 - Sistema AVHRR/NOAA.....	30
2.5 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	32
2.6 - Ruídos no NDVI (AVHRR/NOAA)	34
2.6.1 - Contaminação por Nuvens	35
2.6.2 - Efeitos Atmosféricos.....	35
2.6.3 - Efeitos Devido ao Sensor	37
2.7 - Aplicações de NDVI	38
CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA	43
3.1 - Área de Estudo	43
3.2 - Dados Utilizados	44
3.2.1 - Imagens NDVI do NOAA/AVHRR.....	44
3.2.2 - Radiação de Ondas Longas (ROL)	45
3.2.3 - Indicadores Climáticos do ENSO	45
3.3 - Metodologia	46
3.3.1 - Médias e Anomalias de NDVI E ROL.....	47
3.3.2 - Análise por Componentes Principais (ACP).....	48
3.3.2.1 - Aspectos Matemáticos da ACP	49
3.3.2.2 - ACP dos dados de ROL	55

3.3.2.3 - ACP dos dados de NDVI	55
3.3.3 - Análise de Agrupamento.....	56
3.3.3.1 - Análise de Agrupamento nos dados de NDVI	58
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 - Radiação de Ondas Longas (ROL)	61
4.1.1 - Médias de ROL	61
4.1.2 - Análise por Componentes Principais de ROL	63
4.1.2.1 - Análise da Primeira Componente.....	64
4.1.2.2 - Análise da Segunda Componente.....	65
4.1.2.3 - Análise da Terceira Componente	66
4.1.2.4 - Análise da Quarta Componente.....	68
4.1.2.5 - Análise da Quinta Componente	69
4.2 - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	70
4.2.1 - Análise de Agrupamento do NDVI.....	70
4.2.2 - Análise por Componentes Principais do NDVI	78
4.2.2.1 - Análise da Primeira Componente.....	79
4.2.2.2 - Análise da Segunda Componente.....	82
4.2.2.3 - Análise da Terceira Componente	85
4.2.2.4 - Análise da Quarta Componente.....	87
4.2.2.5 - Análise da Quinta e Sexta Componentes	89
4.2.2.6 - Análise da Décima Componente	91
4.3 - Correlação entre NDVI e ROL.....	93
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICE A - MÉDIA MENSAL E ANOMALIA ANUAL DE ROL	113
APÊNDICE B - MÉDIA MENSAL E SAZONAL DE NDVI.....	117

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1.1 - Composição de NDVI sobre a América do Sul para:(a) 1983 (ano de El Niño) e (b) 1990 (ano normal)	19
2.1 - Comparação dos processos convectivos observados na região do Pacífico Tropical (a) em anos normais e (b) em anos de El Niño.....	22
2.2 - Impactos do El Niño sobre a América do Sul	23
2.3 - Mapa de vegetação do Brasil	26
2.4 - Comportamento espectral da vegetação.....	33
2.5 - Horário de cruzamento no equador dos satélites NOAA no período de 1980 a 1995.....	38
3.1 - Áreas de estudo para: (a) dados de NDVI, o território brasileiro e (b) dados de ROL, janela de latitude 35°N a 35°S e longitudes 10°E a 20°W	43
3.2 - Diagrama do procedimento de análise das conexões entre o NDVI e a variabilidade climática sobre o Brasil.....	47
3.3 - Formas de entrada e saídas dos dados em ACP.....	54
3.4 - Exemplo de árvore (ou chave) de classificação utilizada em análise de agrupamento.....	57
4.1 - Média sazonal de ROL, em Watts/m ² , para o período de 1982 a 1993	62
4.2 - Primeira imagem componente da ACP de ROL	64
4.3 - Autovetores da primeira componente de ROL.....	65
4.4 - Segunda imagem componente da ACP de ROL	66
4.5 - Autovetores da segunda componente de ROL	66
4.6 - Terceira imagem componente da ACP de ROL.....	67
4.7 - Autovetores da terceira componente de ROL	67
4.8 - Quarta imagem componente da ACP de ROL	68
4.9 - Autovetores da quarta componente de ROL	69
4.10 - Quinta imagem componente da ACP de ROL	69
4.11 - Autovetores da quinta componente de ROL	70
4.12 - Resultado da análise de agrupamento realizada nos dados de NDVI	71

4.13 - Média mês-ano do segundo grupo da análise de agrupamento de NDVI	72
4.14 - Média mês-ano do terceiro grupo da análise de agrupamento de NDVI	73
4.15 - Média mês-ano do quarto grupo da análise de agrupamento de NDVI	74
4.16 - Média mês-ano do quinto grupo da análise de agrupamento de NDVI	75
4.17 - Média mês-ano do sexto grupo da análise de agrupamento de NDVI	76
4.18 - Média mês-ano do oitavo grupo da análise de agrupamento de NDVI	77
4.19 - Média mês-ano do nono grupo da análise de agrupamento de NDVI	78
4.20 - Primeira imagem componente da ACP de NDVI	79
4.21 - Autovetores da primeira componente de NDVI.....	80
4.22 - Segunda imagem componente da ACP de NDVI	83
4.23 - Autovetores da segunda componente de NDVI	83
4.24 - Terceira imagem componente da ACP de NDVI.....	86
4.25 - Autovetores da terceira componente de NDVI	86
4.26 - Quarta imagem componente da ACP de NDVI	88
4.27 - Autovetores da quarta componente de NDVI	88
4.28 - Média de NDVI da região central do Nordeste e norte do Rio Grande do Sul.....	89
4.29 - Quinta e sexta imagens componentes da ACP de NDVI	90
4.30 - Autovetores da quinta e sexta componentes de NDVI.....	91
4.31 - Décima imagem componente da ACP de NDVI.....	92
4.32 - Autovetores da décima componente de NDVI.....	92
4.33 - (a) Autovetores da segunda componente de NDVI e ROL, (b) autovetores da terceira componente de NDVI e ROL, (c) autovetores da quarta componente de NDVI e ROL e (d) autovetores da terceira componente de NDVI e da quarta de ROL	94
A.1 - Média mensal de ROL, em Watts/m^2 , de 1982 a 1993	113
A.2 - Anomalia anual de ROL, em Watts/m^2 , de 1982 a 1993	115
B.1 - Média mensal de NDVI do período de 1982 a 1993	117

LISTA DE TABELAS

	pág.
2.1 - Características do Sensor AVHRR/NOAA.....	31
2.2 - Lançamento e Período de Utilização dos Dados do Sensor AVHRR/NOAA	32
2.3 - Canais Espectrais e Aplicações do Sensor AVHRR/NOAA	32
2.4 - Efeitos Atmosféricos nos Canais 1 e 2 e NDVI.....	36
4.1 - Coeficiente de Correlação Linear (r) dos Autovetores das Componentes 2, 3 e 4 da ACP de NDVI e ROL	95

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste século as mudanças provocadas pelo homem no meio ambiente têm sido intensas, ocasionando impactos de diferentes naturezas no solo, na água, na atmosfera, na biodiversidade e na população humana. A conscientização dessas mudanças cresceu e os estudos sobre mudanças globais e seus impactos têm tido destaque no campo das ciências da natureza. As mudanças na cobertura vegetal e uso da terra são importantes fatores que induzem a mudanças globais ambientais, com implicações profundas nos ecossistemas, nos fluxos biogeoquímicos e no clima (NRC, 1988 e IGBP, 1990).

Nas últimas décadas, com o advento do sensoriamento remoto orbital, tornou-se possível o monitoramento da evolução espacial e temporal das mudanças na cobertura da superfície terrestre. Valendo-se de sensores multiespectrais, fenômenos como queimadas, desmatamentos, expansão urbana e mudanças na cobertura vegetal, passaram a ser estudados de forma objetiva. Santos e Novo (1977), utilizaram dados do sensor orbital MSS/Landsat, para realizar um inventário da cobertura vegetal natural na região Amazônica (Nordeste do Mato Grosso), para auxiliar na fiscalização e no desenvolvimento de uma política de ocupação para a área. Setzer et al. (1992), aperfeiçoaram a técnica de monitoramento diário de queimadas, utilizando dados de sensores orbitais (AVHRR/NOAA) de baixa resolução espacial (1 km) e alta resolução temporal (12 horas), auxiliando o governo brasileiro no processo de gerenciamento e fiscalização das áreas de risco de queimadas e focos de fogo.

No caso da vegetação, há um interesse natural em seu monitoramento, uma vez que ela é uma fonte vital para sustentação da vida humana e animal em nosso planeta. Devido ao fato da dinâmica da cobertura vegetal afetar diretamente o ambiente terrestre, informações quantitativas e qualitativas sobre essa cobertura são necessárias para pesquisas de mudanças globais (Townshend et al., 1993).

A vegetação tem uma assinatura espectral específica quando comparada com a grande maioria dos alvos terrestres. Assim, vários estudos relacionados à identificação e

mapeamento da vegetação têm se baseado na premissa de contraste espectral entre a reflectância da vegetação e os elementos de fundo da cena (Rouse et al., 1974). A combinação entre a reflectância da vegetação nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, tem sido denominada índice de vegetação. Um dos índices de vegetação mais conhecidos é o índice de vegetação por diferença normalizada *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) no qual a diferença entre a reflectância no canal do infravermelho próximo e no do vermelho é dividida pela sua soma (Rouse et al., 1974).

Vários estudos têm demonstrado que o NDVI correlaciona-se com variáveis climáticas em amplas condições ambientais. Hellden e Eklundh (1988), constataram que anomalias de NDVI são correlacionadas com anomalias de chuva em diferentes regiões da Etiópia e que há correspondência entre o NDVI e a distribuição de áreas de ocorrência de seca severa e de escassez de chuva. Na América do Sul, Liu et al. (1991), mostraram que as áreas de vegetação com estresse, indicadas pelo NDVI, correspondiam em sua maioria a áreas que sofreram impactos de seca provocadas pelo El Niño. Batista et al. (1997), utilizando dados de NDVI da Amazônia, do período de 1981 a 1991, determinaram os tipos de vegetação dominantes e ainda identificaram variações interanuais associadas a mudanças nas condições ambientais. Barbosa (1998), utilizando médias mensais de precipitação e NDVI, constatou que as distribuições espacial e temporal dessas variáveis na região do Nordeste do Brasil, têm padrões semelhantes e uma relação considerável.

O aprimoramento do conhecimento da relação clima/cobertura vegetal, tem aplicações numa variedade de problemas de interesse prático e científico, que incluem o aumento da produtividade agrícola e a modelagem climática. No caso do Brasil, devido à sua extensão continental e ao predomínio de diversos padrões climáticos, é importante avaliar como a cobertura vegetal responde à variabilidade climática e vice-versa, usando técnicas de sensoriamento remoto. A Figura 1.1, obtida por Batista et al. (1997), evidencia de forma marcante a ocorrência do impacto do El Niño sobre o continente sul americano. Observa-se na Amazônia, por exemplo, grandes diferenças no campo de NDVI num ano de El Niño (Figura 1.1a) quando comparado com um ano normal (Figura 1.1b), além de diferenças significativas em outras regiões.

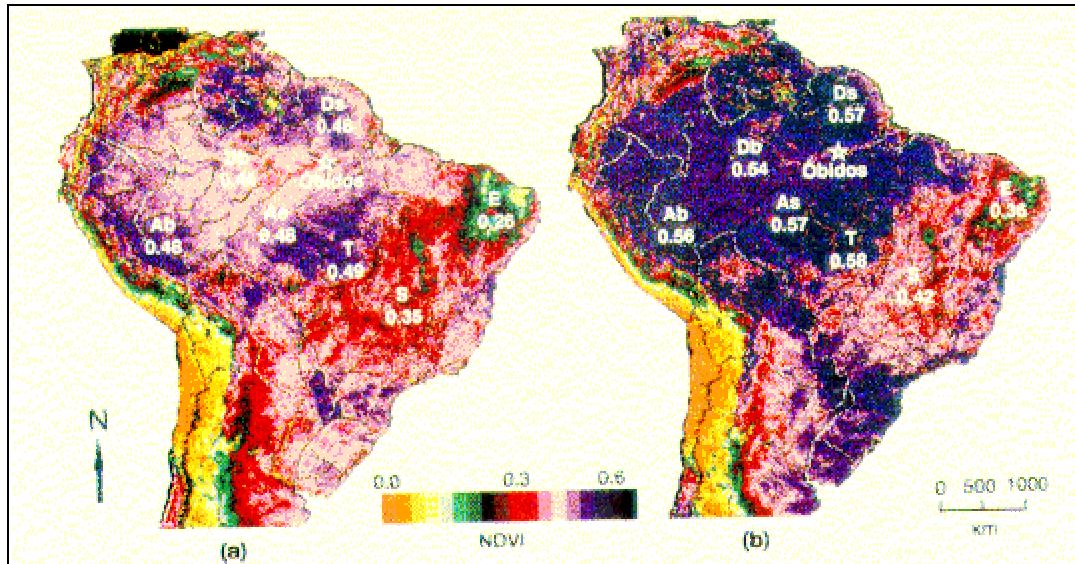


Fig. 1.1 - Composição de NDVI sobre a América do Sul para: (a) 1983 (ano de El Niño) e (b) 1990 (ano normal)
 FONTE: Batista et al. (1997, p. 3199).

Apesar da evolução dos estudos sobre NDVI no Brasil, ainda existem muitas questões em aberto, tais como: as diferenças interanuais são realmente moduladas por oscilações tipo El Niño? Como a cobertura vegetal responde às diferentes oscilações climáticas de grande escala no Brasil?

Motivado por essa problemática, o presente estudo tem como objetivos:

- a) identificar e avaliar os padrões espaciais e temporais de variabilidade do NDVI no Brasil, nas escalas anual e interanual e,
- b) diagnosticar as principais características climáticas associadas às mudanças de grande escala de NDVI no Brasil.

Para a avaliação dos dados, utilizou-se análises de componentes principais e de agrupamentos, que são técnicas de estatística multivariada que possibilitaram estabelecer padrões de variação da vegetação verde relacionados com mudanças/anomalias climáticas. Os dados utilizados foram NDVI e Radiação de Ondas Longas (ROL) obtidos pelo *Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration (AVHRR/NOAA)* do período de 1982 a 1993.

Espera-se que o presente trabalho contribua para melhorar o conhecimento científico no que se refere ao impacto do clima na variabilidade espacial e temporal do NDVI no Brasil, e que a metodologia utilizada possibilite o entendimento e domínio de técnicas estatísticas para serem aplicadas em uma gama de estudos em sensoriamento remoto.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas a revisão bibliográfica e alguns conceitos referentes à variabilidade climática, ROL, vegetação do Brasil, sistema AVHRR/NOAA, NDVI, ruídos no NDVI e algumas aplicações de NDVI.

2.1 VARIABILIDADE CLIMÁTICA

De modo geral, a variabilidade climática anual é bem caracterizada e está associada às estações do ano. Em latitudes médias é marcante o contraste entre as estações do ano, porém, nos trópicos essa variabilidade é menos acentuada em termos da temperatura, sendo expressiva quando se considera a precipitação. No que se refere à variabilidade interanual, em escala global, destaca-se a ocorrência do sinal da Oscilação Sul (OS) sobre o oceano Pacífico Tropical. Essa oscilação afeta tanto o Hemisfério Norte quanto o Sul (Rasmusson e Arkin, 1985). A OS é uma flutuação que ocorre no campo de pressão no oceano Pacífico Sul, envolvendo trocas de ar entre a alta subtropical do Pacífico Sudeste e o centro de baixa pressão da região equatorial da Indonésia (Lockwood, 1985).

Em grande escala, os padrões anômalos da circulação atmosférica nos trópicos são modulados pela circulação de Walker, que é uma circulação zonal direta (ar quente sobe e ar frio desce). Essa circulação envolve dois ramos, um com movimentos verticais ascendentes e instabilidade nas regiões tropicais da Indonésia, África e Amazônia, e outro ramo dominado por movimentos descendentes no Pacífico e Atlântico Leste.

Normalmente, na faixa tropical do oceano Pacífico os ventos sopram de leste para oeste. Como consequência, ocorre um acúmulo de água no setor oeste, elevando o nível do oceano Pacífico Oeste na Indonésia. Em anos de El Niño/Oscilação Sul - *El Niño/Southern Oscillation* (ENSO), os ventos de leste enfraquecem, chegando em algumas áreas na faixa tropical a inverterem o sentido. Desta forma, a água mais quente do oeste pode ser transportada para leste, resultando em temperaturas acima da média na costa

oeste da América do Sul. A situação inversa ocorre na Indonésia e no norte/nordeste da Austrália (Figura 2.1). O fenômeno inverso é conhecido como La Niña e é caracterizado pelo resfriamento anômalo das águas superficiais no Oceano Equatorial Central e Oriental. As temperaturas habituais da água do mar à superfície nesta região, situam-se em torno de 25°C, ao passo que, durante o episódio La Niña, tais temperaturas diminuem para cerca de 23° a 22° C. Na realidade, o mecanismo de aquecimento e resfriamento do Pacífico é muito mais complexo; uma descrição abrangente do assunto pode ser encontrada em Ropelewski e Halpert (1987, 1989) e Rasmusson (1991).

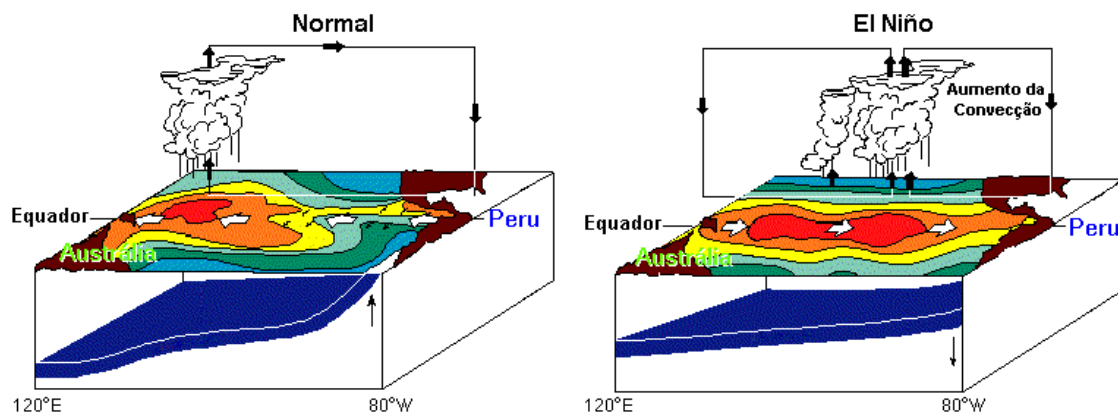


Fig. 2.1 - Comparação dos processos convectivos observados na região do Pacífico Tropical (a) em anos normais e (b) em anos de El Niño.
 FONTE: Adaptada de CLIMERH (1999).

Os fenômenos El Niño e La Niña provocam mudanças no sistema oceano-atmosfera do Pacífico Equatorial Oriental e são caracterizados pelo aquecimento e resfriamento anômalo das águas superficiais nessa região. Os anos de El Niño caracterizam-se por anomalias positivas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico Leste e são denominados episódios quentes ou fases quentes. Essas fases podem persistir por vários meses durante a fase negativa da OS. O aquecimento e o subsequente resfriamento num episódio típico de ENSO pode durar de 12 a 18 meses. A evolução do fenômeno mostra que tipicamente ele inicia no começo do ano e atinge a máxima intensidade durante o mês de dezembro do mesmo ano e janeiro do ano seguinte, enfraquecendo no meio desse ano. A fase fria (episódio frio) ocorre durante a fase positiva da OS sendo denominada por La Niña (CPTEC, 1998).

O aumento da emissão dos fluxos de calor sensível e de vapor d'água da superfície do oceano Pacífico Equatorial para a atmosfera, provocado pelo aumento da temperatura da água durante o ENSO, provoca mudanças na circulação atmosférica e na precipitação em escala regional e global. Por sua vez, isto provoca mudanças nas condições meteorológicas e climáticas em várias partes do mundo (CPTEC, 1998).

No Brasil, alguns estudos indicam que o semi-árido do nordeste, norte e leste da Amazônia, sul do Brasil e vizinhanças são afetados de forma pronunciada pelo fenômeno ENSO. Na região sul ocorre um aumento da precipitação, particularmente durante a primavera do primeiro ano e no fim do outono e início do inverno do segundo ano. O norte e o leste da Amazônia e o nordeste do Brasil são afetados pela diminuição da precipitação, principalmente no segundo ano, entre fevereiro e maio, quando se tem a estação chuvosa do semi-árido. O sudeste do Brasil apresenta temperaturas mais altas, tornando o inverno mais ameno. Nas demais regiões do país os efeitos são menos pronunciados e variam de um episódio para outro (Kousky e Cavalcanti, 1984 e CPTEC, 1998). Uma visão geral do que ocorre sobre o Brasil e no continente sul americano durante o El Niño pode ser observada na Figura 2.2.

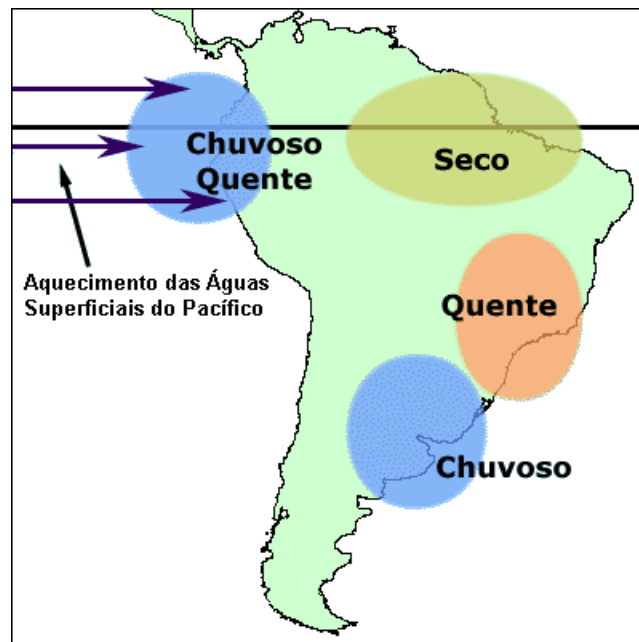


Fig. 2.2 - Impactos do El Niño sobre a América do Sul.
FONTE: Adaptada de CPTEC (1998).

2.2 RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS (ROL)

Uma variável muito utilizada para a caracterização climática nos trópicos é a emissão para o espaço de Radiação de Ondas Longas (ROL), medida por satélites. Esta variável está relacionada à lei de Stefan-Boltzmann ($E = \sigma T^4$, onde E é a taxa total de emissão de energia por unidade de área da superfície de um corpo negro, T é a temperatura do corpo emissor e σ é a constante de Stefan-Boltzmann) aplicada à temperatura da superfície terrestre. De acordo com esta lei, quanto menor for a temperatura da superfície menor será a emissão de ondas longas. Em meteorologia, a ROL é muito utilizada para indicar a presença de nuvens convectivas nos trópicos, cujos topos atingem elevadas altitudes e normalmente são associadas à ocorrência de precipitação. Quanto mais alto estiver o topo de uma nuvem, mais baixa será a emissão de ondas longas, e por isso a ROL pode ser utilizada como um indicador de precipitação. Porém, como a ROL baseia-se na temperatura da superfície dos alvos, ela deve ser utilizada apenas nas regiões tropicais, pois a baixa temperatura da superfície terrestre das latitudes médias e altas, principalmente no inverno, propiciam a interpretação errônea da presença de nuvens nestas regiões (Ohring et al., 1984).

Diversos estudos já exploraram o uso de ROL para caracterização climática. Um dos trabalhos pioneiros foi realizado por Heddinghaus e Krueger (1981), que utilizaram médias mensais de ROL para caracterizar as variações anuais e interanuais nos trópicos através da técnica estatística de Funções Ortogonais Empíricas - *Empirical Orthogonal Function* (EOF), que também é conhecida como Análise por Componentes Principais (ACP). Eles constataram que a primeira componente representava o modo verão/inverno do ciclo anual; a segunda representava o modo de primavera/outono e a terceira o ciclo semi-anual. Kousky e Kayano (1994), a partir de dados de anomalia de ROL, diagnosticaram variações, tanto no padrão da convecção tropical, como na intensidade do vento zonal na alta troposfera tropical. Essas variações estavam associadas a padrões atmosféricos vinculados a situações de extremo da OS na América do Sul.

Em estudo também sobre série histórica de ROL (1979 a 1992), Kayano et al. (1995), analisaram o impacto de se corrigirem ou não os erros ocasionados pelos diferentes

horários em que o satélite cruza o equador. Através da técnica EOF eles mostraram que a utilização da série não corrigida de ROL induzia a obtenção de uma componente (segunda) sem significado físico. Ao analisarem uma série histórica, porém, de anomalia de ROL (1974 a 1996), Waliser e Zhou (1997), constataram que as três primeiras componentes estão associadas às variações interanuais. A primeira componente destacou os eventos de El Niño de 1975-76, 1982-1983, 1987, 1988-89 e 1992, a segunda os eventos de 1972-73 e 1986-87 e a terceira o evento de 1982-83. A quarta componente revelou as variações de ROL ocasionadas por mudança no horário da passagem do satélite.

Andreoli (1998), utilizando pêncladas (média de cinco dias) de ROL e EOF, constatou que as máximas variâncias interanuais e totais nos trópicos estão associadas às variações sazonais da convecção tropical. Ela mostrou que no verão as correlações negativas/positivas de ROL nos trópicos estão associadas a regiões de intensa/reduzida convecção.

2.3 VEGETAÇÃO DO BRASIL

A vegetação do Brasil, para fins geográficos, pode ser dividida em dois territórios: o amazônico e o extra-amazônico (IBGE, 1993). No território amazônico, o sistema ecológico vegetal responde a um clima de temperatura média em torno de 25°C, com chuvas torrenciais bem distribuídas durante o ano, sem déficit hídrico mensal no balanço ombrotérmico anual. No território extra-amazônico (área intertropical), o sistema ecológico vegetal responde a dois climas: o tropical, de temperaturas médias em torno de 22°C e precipitação estacional marcada por um período com déficit hídrico de mais de 60 dias no balanço ombrotérmico anual, e o subtropical, de temperaturas suaves no inverno, que amenizam a média anual em torno de 18°C, com chuvas moderadas bem distribuídas durante o ano, sem déficit hídrico no balanço ombrotérmico anual, mas com uma estacionalidade térmica provocada pelos dias frios do ano (IBGE, 1993).

A ação do homem através da devastação da cobertura vegetal primitiva, que teve início com a colonização do Brasil, é marcante nas regiões sul, sudeste, nordeste e parte do centro-oeste do país. Na região norte esta ação devastadora é mais recente (década de 60

com maior incremento nos anos 70/80), e por esta razão, mantém a maior parte da sua vegetação primitiva conservada. Atualmente, existe uma grande preocupação com os elevados índices de desmatamento em Rondônia, oeste do Tocantins, sul do Pará e norte do Mato Grosso, que formam a região conhecida como “arco-de-desflorestamento”.

Na Figura 2.3, estão delineados os prováveis limites dos tipos de vegetação nativa que revestiam o território brasileiro e sobre estes estão representadas as regiões antropizadas. De uma forma geral, segundo o IBGE (1993), a vegetação brasileira pode ser dividida em dez grandes tipos de vegetação. Algumas das principais características desses grupos de vegetação, bem como a sua distribuição geográfica, serão apresentadas nos tópicos a seguir:

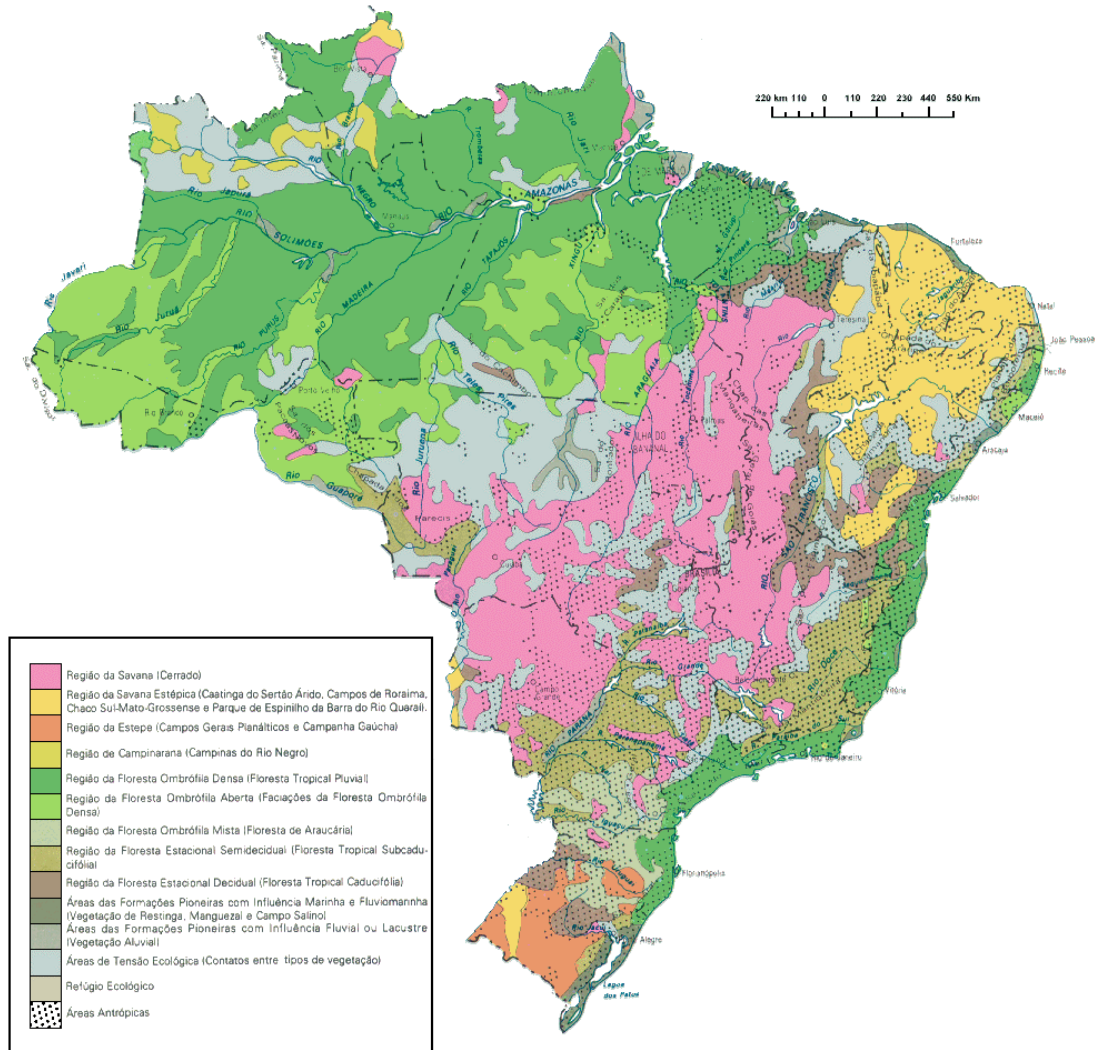


Fig. 2.3 – Mapa de vegetação do Brasil.
FONTE: IBGE (1993, p.62).

a) Savana (Cerrado/Campos)

A savana é uma vegetação que ocorre predominantemente no centro-oeste, mas suas disjunções aparecem na Amazônia setentrional desde o vale do rio Tacutu, em Roraima, até os tabuleiros do Amapá, no litoral e no interior do nordeste, no planalto sedimentar da bacia do rio Paraná na região sudeste e sul e em partes do planalto Meridional. Devido à intensa ação antrópica a que foi submetida, grande parte de sua vegetação nativa foi substituída por agricultura, pastagens e reflorestamento. Esta vegetação apresenta formações de floresta à gramíneo-lenhosa, em geral serpenteadas por florestas-de-galerias. Ela caracteriza-se por apresentar uma estrutura composta por árvores baixas tortuosas, isoladas ou agrupadas sobre um contínuo tapete de gramíneas.

b) Estepe (Caatinga/Campanha Gaúcha)

Esse tipo de vegetação ocorre no Brasil em duas áreas geograficamente distintas: na caatinga do sertão árido nordestino e na campanha gaúcha. A estepe do sertão árido nordestino (caatinga) abrange várias formações que constituem um tipo de vegetação estacional-semidecidual. Portanto, apresentam estratos arbóreo e gramíneo-lenhoso periódicos com numerosas plantas suculentas, sobretudo cactáceas. As árvores são baixas, raquíticas, de troncos delgados e com engalhamento profuso. A maioria das espécies demonstra que possui adaptações fisiológicas bastante especializadas à economia de água.

No sul do país, na fronteira com o Uruguai e a Argentina, encontra-se a campanha gaúcha. Este tipo de vegetação ocorre na área subtropical brasileira, onde as plantas são submetidas a dupla estacionalidade: uma fisiológica, provocada pelo frio das frentes polares, e outra seca, mais curta, com déficit hídrico. Ela é caracterizada por uma vegetação essencialmente campestre, com o domínio das gramíneas, que cobre as superfícies conservadas do planalto da campanha e da depressão do rio Ibicuí – rio Negro.

Deve-se ressaltar que estes dois primeiros tipos de vegetação não estão representados corretamente na figura 2.3, pois esta nova divisão, do próprio IBGE, ainda não possui um novo mapa.

c) Savana Estépica (Vegetação Chaquenha, Campos de Roraima e Campanha Gaúcha)

A savana estépica é um tipo de vegetação em geral de cobertura arbórea e várias cactáceas, cobrindo um estrato graminoso. Ela apresenta-se no Brasil em três áreas geograficamente distintas: o Pantanal Mato-Grossense, os Campos de Roraima e a Campanha Gaúcha.

Entre a serra da Bodoquena (MS) e o rio Paraguai, encontra-se a segunda maior área de ocorrência da savana estépica no Brasil. A sua vegetação é caracterizada por dois estratos: um lenhoso que é estacional e estépico, e outro graminoso. Seu período seco oscila de três a cinco meses, com altas temperaturas no verão e com baixas térmicas no inverno, em face das massas polares que penetram através da depressão do rio Paraguai.

Em Roraima, na divisa com a Venezuela, esse tipo de vegetação é encontrado entre o relevo dissecado do monte Roraima e a planície do rio Branco. Um número expressivo de gêneros da caatinga e do chaco compõe a florística dessa região. Este tipo de vegetação está associado a um período seco prolongado (estimado em cinco a seis meses secos) que se alterna com um período de chuvas torrenciais.

No sul do Brasil, como parte da campanha gaúcha, este tipo de vegetação se localiza na porção sul-sudoeste do Rio Grande do Sul. Nesta região, há ocorrência de um considerável número de espécies do estrato lenhoso arbóreo pertencentes aos gêneros de origem estépica da flora chaqueana.

d) Floresta Ombrófila Densa (Floresta Amazônica/Mata Atlântica)

Esta formação vegetal, ocorre sob um clima ombrófilo sem período biologicamente seco durante o ano e, excepcionalmente, com dois meses de umidade escassa. Este

tipo de vegetação ocupa parte da região amazônica e estende-se também pela costa atlântica, desde o sul de Natal, no Rio Grande do Norte, até o Espírito Santo. Ela também ocorre em “bolsões” contidos entre o litoral e as serras marginais ao oceano, ampliando a sua área de ocorrência sobre as encostas das mesmas até Osório, no Rio Grande do Sul. As duas áreas deste tipo de vegetação são constituídas por grandes árvores nos terraços aluviais e nos tabuleiros e árvores de porte médio nas encostas marítimas.

e) Floresta Ombrófila Aberta (Floresta de Transição)

Este tipo de vegetação, situado entre a Amazônia e o espaço extra-amazônico, é também conhecido como “área de transição” ou “área de contato”. A fisionomia florestal é composta de árvores mais espaçadas, com estrato arbustivo pouco denso. Nesta região, ocorrem quatro tipos florísticos que alteram a fisionomia ecológica da floresta ombrófila densa, imprimindo-lhe uma forma mais aberta: a floresta-de-palmeiras (cocal), a floresta-de-bambu, a floresta-de-cipó e a floresta-de-soroca (sorocal).

f) Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária)

Este tipo de vegetação, também conhecido como “mata-de-arauucária” ou “pinheral”, é exclusivo do planalto Meridional Brasileiro. Porém, apresenta algumas disjunções (áreas isoladas) nas partes elevadas das Serras do Mar e da Mantiqueira.

g) Floresta Estacional Semidecidual (Mata Semicaducifólia)

Esta formação vegetal está condicionada à dupla estacionalidade climática, uma tropical com época de intensas chuvas de verão, seguida por estiagem, e outra subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio do inverno. Essas características determinam uma estacionalidade foliar dos elementos arbóreos dominantes, os quais têm adaptação ora à deficiência hídrica, ora à queda da temperatura nos meses frios. A percentagem das árvores caducifólias, no conjunto florestal situa-se entre 20% e 50% na época desfavorável. Este tipo de vegetação é encontrada em grande parte da região sudeste e em alguns pontos do nordeste.

h) Floresta Estacional Decidual (Floresta Tropical Caducifolia)

Este tipo de vegetação está associada a uma estação chuvosa seguida de um longo período seco, apresentando um estrato arbóreo predominantemente caducifólio, com mais de 50% dos indivíduos desprovidos de folhagem na época desfavorável. Ele ocorre no território brasileiro de modo disperso e descontínuo.

i) Áreas das Formações Pioneiras com Influência Marinha e Fluvio-marinha (Vegetação de Restinga e Manguezal)

As formações pioneiras com influência marinha e fluvio-marinha são as áreas de vegetação de restinga, manguezal e campo salino. As restingas são áreas com influência marinha, e constituem os cordões litorâneos e dunas que ocorrem ao longo de todo o litoral, formadas pela constante deposição de areia por influência direta da ação do mar. Nesta área são encontradas fisionomias desde a herbácea até a arbórea. Já as áreas com influência fluvio-marinha (manguezal e campo salino), constituem os ambientes salobros na desembocadura dos cursos de água no mar, onde se desenvolve uma vegetação que pode apresentar fisionomia arbórea ou herbácea.

j) Área de Formações Pioneiras com Influência Fluvial ou Lacustre (Vegetação Aluvial)

Trata-se de áreas de acumulação dos cursos de água, lagoas e assemelhados, que constituem os terrenos aluviais sujeitos ou não a inundações periódicas. A vegetação que se instala nestes ambientes, varia de acordo com a intensidade e duração da inundação, apresentando fisionomia arbustiva ou herbácea.

2.4 SISTEMA AVHRR/NOAA

A série de satélites NOAA com o sensor AVHRR a bordo foi concebida inicialmente para estudos meteorológicos, com o propósito de monitorar a temperatura das superfícies de nuvens, oceanos e continentes. Porém, após o lançamento do NOAA 7 no início da década de 80, este sensor tornou-se importante para estudos da dinâmica da

vegetação. Este avanço ocorreu devido a disponibilidade de múltiplas bandas espectrais (uma no visível e outra no infravermelho próximo), que são adequadas para o monitoramento da vegetação.

A série ímpar dos satélites NOAA (7, 9 e 11), cruza o equador no período da tarde ($\pm 14:00h$) na sua órbita ascendente e, portanto, permite o estudo de alvos terrestres com iluminação adequada. O mesmo não acontece com a série par, que cruza o equador pela manhã ou durante a noite ($\pm 7:30$ a.m. e p.m.). A Tabela 2.1 descreve as principais características do sensor AVHRR e os parâmetros orbitais dos satélites NOAA; maiores detalhes podem ser obtidos em Kidwell (1998).

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DO SENSOR AVHRR/NOAA

Órbita	sol-síncrona
Ciclo de Cobertura	9 dias
Ângulo de Visada (Nadir)	$\pm 55,4^\circ$
Faixa de Imageamento	2.400 km
Altitude Orbital	~ 833 km
Inclinação Orbital	$98,8^\circ$
Período Orbital	102 min
Órbitas/Dia	14,1
Campo de Visada Instantâneo (Nadir)	1,4 mrad e/ou 1,1 km
Quantização	10 bits

FONTE: Adaptada de Kidwell (1998).

A partir do NOAA-7, lançado em 23/06/81 (Tabela 2.2), o AVHRR passou a ter cinco bandas espectrais, sendo que as duas primeiras (visível e infravermelho próximo), correspondem as bandas MSS-5 e MSS-7 ou as bandas TM-3 e TM-4 do Landsat, embora mais estreitas. Estas bandas têm sido amplamente utilizadas em estudos de vegetação, tais como: mapeamento da cobertura do solo (Townshend et al., 1987), caracterização da dinâmica da vegetação (Malingreau et al., 1989; Potter e Brooks, 1998), estimativa da produção de vegetação (Goward et al., 1985; Prince e Goward, 1995), estimativa de parâmetros biofísicos (Tucker et al., 1986; Myneni et al., 1998),

monitoramento e avaliação de risco de queimada (Setzer et al., 1992), entre outros. A principal vantagem do AVHRR/NOAA é a alta frequência de imageamento resultante da grande faixa imageada. Isto possibilita o acompanhamento da variação fenológica da vegetação ao longo das estações do ano, ou das variações devidas a eventos em escala regional e global (Batista et al., 1993). A Tabela 2.3 descreve a faixa espectral de cada canal do sensor e suas aplicações.

TABELA 2.2 - LANÇAMENTO E PERÍODO DE UTILIZAÇÃO DOS DADOS DO SENSOR AVHRR/NOAA

Satélite	Data de Lançamento	Período de Utilização
NOAA-7	23 de junho de 1981	19 de agosto de 1981 - 7 de junho de 1986
NOAA-9	12 de dezembro de 1984	25 de fevereiro de 1985 - 7 de novembro de 1988
NOAA-11	24 de setembro de 1988	8 de novembro de 1988 - 11 de abril de 1995

FONTE: Adaptada de Kidwell (1998).

TABELA 2.3 - CANAIS ESPECTRAIS E APLICAÇÕES DO SENSOR AVHRR/NOAA

Canal	NOAA 7, 9, 11, 12, 14	Aplicações
1	0,58 - 0,68 μm	Mapeamento diurno de nuvens, gelo e neve e monitoramento de vegetação.
2	0,725 - 1,10 μm	Mapeamento de massas d'água e monitoramento de vegetação.
3	3,55 - 3,93 μm	Mapeamento noturno de nuvens, monitoramento da Temperatura da Superfície do Mar (TSM); detecção de queimadas e atividades vulcânicas.
4	10,3 - 11,3 μm	Mapeamento noturno e diurno de nuvens, TSM, umidade do solo e atividades vulcânicas.
5	11,5 - 12,5 μm	Mapeamento noturno e diurno de nuvens, TSM e umidade do solo.

FONTE: Adaptada de Kidwell (1998).

2.5 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

Grande parte dos sensores remotos orbitais, são sensores ópticos, pois operam na faixa de 0,38 - 15 μm do espectro eletromagnético, a qual está subdividida em quatro sub-regiões: visível (azul, verde e vermelho), infravermelho próximo, médio e termal. Cada

objeto da superfície terrestre, devido à sua composição física e química, apresenta um comportamento espectral particular em relação aos comprimentos de ondas em cada uma destas regiões. O dossel da vegetação verde (Figura 2.4) por exemplo, absorve fortemente a radiação solar incidente na região do vermelho (0,55 – 0,70 μm), devido à presença de alta quantidade de pigmentos de clorofila e de carotenos existentes na folha. Por outro lado, a vegetação verde tem uma alta reflectância na região do infravermelho próximo (0,70 – 1,30 μm), devido às características estruturais das folhas e efeitos fenológicos do dossel (Guyot et al., 1989). Desta forma, muitas combinações entre a reflectância dos canais da região do vermelho e do infravermelho próximo têm sido propostas. Neste caso o é a obtenção do máximo contraste entre as propriedades das folhas, para melhor caracterizar o vigor da vegetação. Estas combinações têm sido denominadas de índices de vegetação, e compactam as informações de dois canais espectrais em um só.

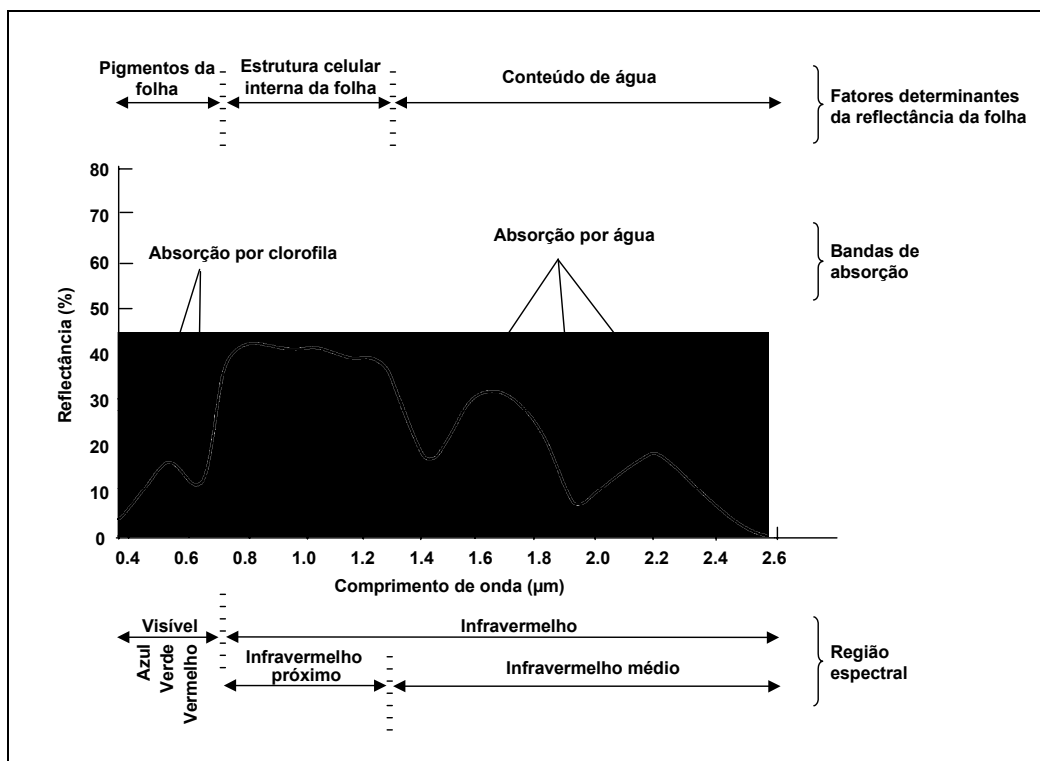


Fig. 2.4 - Comportamento espectral da vegetação.
 FONTE: Modificada de Swain e Davis (1978, p. 232).

Segundo Barbosa (1998), um índice de vegetação ideal minimiza os efeitos variáveis de brilho de fundo, enquanto enfatiza variações das medidas decorrentes da variação da densidade de vegetação. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) tem sido amplamente utilizado por proporcionar um forte sinal da vegetação, e oferecer um bom contraste com outros objetos da superfície terrestre (Tucker e Sellers, 1986).

O NDVI é expresso pela razão entre a diferença da medida da reflectância nos canais do infravermelho próximo e vermelho e a soma desses canais (Rouse et al., 1974), ou seja,

$$\text{NDVI} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1) \quad (2.1)$$

onde, ρ_1 e ρ_2 , representam respectivamente, os valores da reflectância na região do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético de objetos na superfície terrestre.

Os valores de NDVI para as áreas com vegetação dependem da sua arquitetura, densidade e umidade e variam entre 0,1 e 0,6. Os maiores valores desta variável estão associados a coberturas vegetais mais densas. A presença de nuvens e água, geralmente está associada a valores negativos de NDVI. Rochas e solos expostos possuem reflectância similares nas duas regiões espectrais utilizadas para o cálculo do NDVI, ocasionando, portanto, valores próximos a zero (Holben, 1986).

2.6 RUÍDOS NO NDVI (AVHRR/NOAA)

De acordo com Gutman (1991), há diversas fontes de ruídos que interferem nas imagens de NDVI obtidas pelo sensor AVHRR/NOAA. Os principais tipos de ruído se devem à contaminação por nuvens, efeitos atmosféricos ocasionado por gases e aerossóis e problemas relacionados ao sensor. Estes efeitos, bem como alternativas para amenizá-los são discutidos a seguir.

2.6.1 CONTAMINAÇÃO POR NUVENS

Segundo Gallaudet e Simpson (1991), o período em que ocorre o máximo de desenvolvimento das nuvens nos trópicos é coincidente com a passagem vespertina dos satélites NOAA 7, 9, 11 e 14. As nuvens possuem alta reflectância nos canais um e dois, resultando em valores negativos de NDVI (-0,05 a -0,20). A maior parte dos dados com nuvens podem ser identificados devido a sua baixa temperatura, podendo assim serem eliminados. A redução de contaminação por nuvens, pode ser feita através do mascaramento do pixel que apresente no canal cinco do AVHRR, temperatura menor que 273 K. Porém, se o sistema de nuvens estende-se por várias camadas, ou se têm emissividade variável ou ainda se ocorrer pixels misturados (parte nuvens e sombras de nuvens, e parte superfície terrestre), a identificação destes pixels torna-se muito difícil, e portanto eles são inadvertidamente incorporados aos dados (Gallaudet e Simpson, 1991).

Estudos sobre a distribuição de nuvens mostram que frequentemente ocorrem subpixels com nuvens menores que 1,1 km. Além disso, áreas com alta cobertura de nuvens coincidem com áreas densamente vegetadas, como a Amazônia, significando que a contaminação por nuvens torna-se um sério problema para o monitoramento da vegetação (Almeida, 1997).

2.6.2 EFEITOS ATMOSFÉRICOS

A radiação proveniente do sol ao atravessar a atmosfera interage com ela, resultando nos processos físicos denominados espalhamento, devido a presença de moléculas e aerossóis, e absorção, devido a presença de gases atmosféricos.

A absorção por gases ocorre em bandas específicas e depende da composição atômica e molecular de cada gás absorvedor. Os principais gases absorvedores no visível e infravermelho são o ozônio e o vapor d'água. Segundo Justice et al. (1991), o aumento do vapor d'água na atmosfera causa uma diminuição no valor do NDVI, enquanto que o aumento do conteúdo de ozônio provoca um aumento nesta variável.

Os aerossóis são partículas sólidas ou líquidas com raio de 0,01 a 20 μm , que quando interagem com a radiação solar provocam o espalhamento. Diversos estudos demonstraram que os constituintes atmosféricos até 80 km de altura influenciam na quantização da radiação visível, e a presença de aerossóis pode modificar as características espectrais e a resolução dos detalhes da superfície terrestre (King et al., 1992 e Tanré et al., 1992). A Tabela 2.4 apresenta de forma simplificada a influência dos diferentes componentes da atmosfera nos canais 1 e 2 do AVHRR/NOAA e no NDVI.

TABELA 2.4 – EFEITOS ATMOSFÉRICOS NOS CANAIS 1 E 2 E NDVI

	Canal 1	Canal 2
Ozônio	Redução na reflectância de 5 a 15%	Nenhum efeito
	Aumento no NDVI de 0,00 a 0,03 para áreas com vegetação esparsa	
Espalhamento Molecular	Aumento na reflectância de 0,02 a 0,07%	Aumento na reflectância de 0,005 a 0,025%
	Redução no NDVI de 0,00 a 0,10 para áreas com vegetação densa	
Aerossóis	Aumento da reflectância de 0,02 a 0,08% para névoa moderada e 0,10 a 0,15% para alta turbidez	Mesmo efeito do canal 1
	Redução do NDVI de 0,00 a 0,20 para áreas com vegetação densa	
Vapor D'água	Redução na reflectância de 0,0 a 0,5%	Redução da reflectância de 10 a 30%
	Redução do NDVI de 0,01 a 0,10 para áreas com vegetação esparsa	

FONTE: Adaptada de Tanré et al. (1992, p.238).

Deve-se destacar também os aerossóis de origem vulcânica. A erupção do El Chincón no México, em abril de 1982 e do Monte Pinatubo nas Filipinas, em junho de 1991, que foi a mais intensa já verificada na história do sensoriamento remoto (Schultz e Halpert, 1995). Estas erupções aumentaram drasticamente a nível planetário, a quantidade de aerossóis ópticos na atmosfera. A contaminação devido a estes aerossóis provocaram uma diminuição no valor do NDVI. Schultz e Halpert (1995) verificaram uma queda de 20% na média global de NDVI para o ano de 1991, e Holben (1986) constatou uma

variação no entorno de 0,06 no NDVI na visada no nadir para o ano de 1982 das regiões mais próximas do vulcão e entorno de 0,02 na Amazônia. Porém, deve-se ressaltar que estas grandes erupção ocorreram junto com eventos de El Niño que também ocasionam variações no NDVI (Batista et al., 1997).

2.6.3 EFEITOS DEVIDOS AO SENSOR

Ao longo do período de operação o sensor AVHRR sofre um processo de degradação, resultando em variações no valor do NDVI. Um outro fator que também ocasiona variações é a substituição do sensor/satélite, que é realizada periodicamente, quando este está próximo de atingir sua vida útil.

Alguns estudos mostram que devido ao atrito do satélite com a atmosfera terrestre, ocorre uma deriva na órbita inicial do mesmo. Isto ocasiona um aumento gradual no horário de cruzamento no equador em relação a hora solar local, podendo chegar a uma diferença de até três horas (Figura 2.5) durante a vida útil do satélite. Esta diferença provoca um aumento no ângulo de observação solar zenital, ocasionando uma diminuição no valor do NDVI (Gutman, 1991).

Um outro problema observado é a degradação da calibração de pré-lançamento do satélite com o passar do tempo. Esta degradação afeta cada canal espectral de maneira distinta. A reflectância do canal 1 aumenta rapidamente, enquanto que a do canal 2 é mais lenta, ocasionando um aumento gradual no valor do NDVI. Entretanto, este tipo de mudança é relativamente pequeno quando se considera as mudanças ocasionadas por outros fatores da cobertura vegetal (Kaufman e Holben, 1993). Segundo Gutman (1991), observam-se também problemas quando ocorrem mudanças de satélites. Essas mudanças resultam em descontinuidade dos dados devido a diferença de calibração e do ângulo solar zenital, o que altera o valor do NDVI.

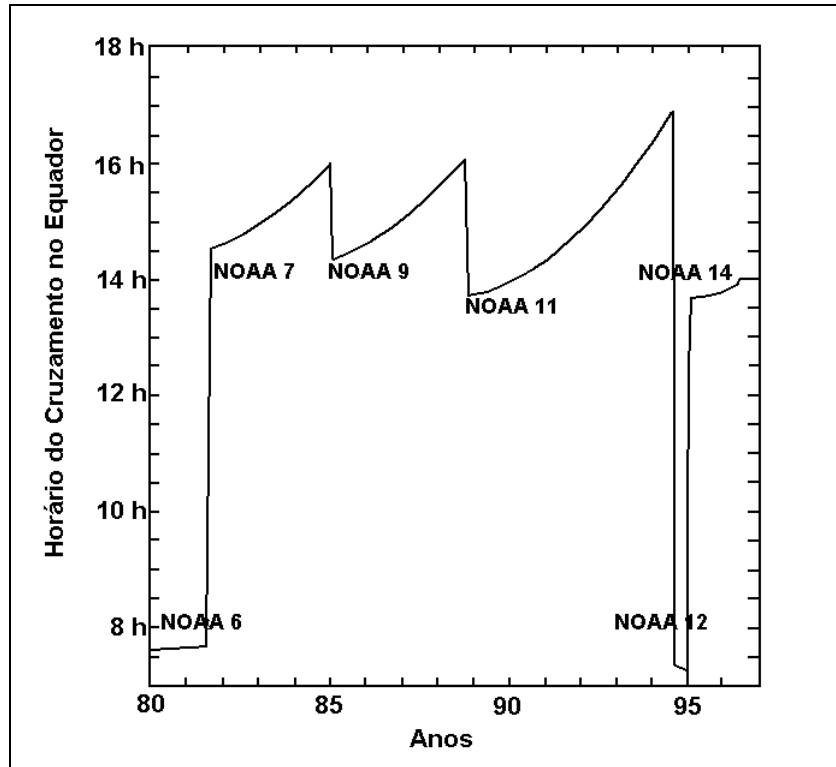


Fig. 2.5 - Horário de cruzamento no equador dos satélites NOAA no período de 1980 a 1995.

FONTE: Adaptada de Waliser e Zhou (1997, p. 2128).

2.7 APLICAÇÕES DE NDVI

Algumas aplicações de NDVI incluem: monitoramento de cultivo agrícola regional, estudos de desertificação e monitoramento de seca, monitoramento ambiental terrestre, e estudos globais de balanços de água e energia. Um grande número de estudos tem mostrado que o NDVI tem uma correlação considerável com variáveis climáticas, tais como a precipitação e a temperatura da superfície terrestre, em amplas condições ambientais (Smith e Choudhury, 1990; Schultz e Halpert, 1995; Ehrlich e Lambin, 1996; Roy et al., 1997 e Manso et al., 1998).

Recentemente, atenção considerável tem sido dada aos índices de vegetação calculados a partir do sensor AVHRR da série NOAA. Esses dados apresentam resolução espacial de 1,1 x 1,1 km no nadir, no entanto, são utilizados muitas vezes na forma degradada, com resolução de 8 x 8 km. O NDVI calculado a partir dos dados do AVHRR é

frequentemente utilizado para o monitoramento regional ou global da vegetação, por compensar parcialmente mudanças de condições de iluminação, declive superficial, aspectos de visadas, e opacidade atmosférica (Barbosa, 1998). Deste modo, eles fornecem uma fonte bastante efetiva para análise de variações climáticas em diversas escalas de tempo.

O Grupo de Estudos de Monitoramento, Modelamento e Inventário Global (GIMMS - *Global Inventory Modeling and Monitoring Study*) da GSFC/NASA (*Goddard Space Flight Center / National Aeronautics & Space Administration*), produz e gerencia um grande conjunto de dados de NDVI, obtidos através de imagens AVHRR/NOAA. Diversos estudos já foram feitos utilizando estes dados, tal como o de Potter e Brooks (1998), que realizaram uma análise global entre a variabilidade anual do clima e a variabilidade sazonal do NDVI. Além do NDVI, eles utilizaram três índices climáticos (temperatura diária, total de precipitação anual e índice de umidade anual), que juntos explicaram cerca de 70 a 80% das variações geográficas sazonais extremas (máximo e mínimo) de NDVI. As análises foram baseadas na técnica de regressão multilinear e em algoritmos suavizados de Fourier. Os resultados mostram que as regiões onde o NDVI não tiveram boa relação com o clima foram as regiões: de latitudes altas; as que possuem tipos de vegetação mesclados; as que apresentam distúrbios na vegetação; e as regiões remotas onde os dados de estações climatológicas são esparsos.

Com o objetivo de delinear a dimensionalidade multitemporal do NDVI derivado do AVHRR/NOAA, Townshend et al. (1985), utilizaram dois conjuntos de dados que foram analisados através de Análise por Componentes Principais (ACP). Eles utilizaram oito imagens de NDVI do continente africano e dez imagens da América do Norte para o período de abril de 1982 a março de 1983. Os dois conjuntos de imagens mostraram similaridade nas duas primeiras componentes. A primeira correspondia à média anual de NDVI e a segunda à sazonalidade do NDVI na África, provocada pela progressão assíncrona das estações nos dois hemisférios; na América do Norte essa componente estava relacionada ao verão/inverno. Para os dados da África, em particular, as feições espaciais definidas pelas duas primeiras componentes permitiram separar os principais tipos de vegetação.

Eastman e Fulk (1993), também com o objetivo de realizar um estudo multitemporal de NDVI sobre o continente africano, utilizaram a técnica de componentes principais padronizadas em uma série de 36 meses (1986-88). Eles verificaram que a primeira componente encontrada, representa as características do NDVI independente da estação do ano. A segunda, a terceira e a quarta componentes, destacaram a variabilidade sazonal dessa variável. A quinta e a sexta componentes mostraram a flutuação no valor do NDVI, decorrente das sucessivas mudanças no horário do cruzamento de satélite sobre o equador e a sétima e oitava ilustraram as anomalias de NDVI relacionadas aos eventos de ENSO, principalmente no sul da África.

Anyamba e Eastman (1996), utilizaram séries temporais mensais de NDVI, no período de 1986 a 1990, para avaliar tendências na variabilidade da vegetação verde da África e suas conexões climáticas, utilizando ACP. Eles encontraram tendências sazonais associadas aos sinais de variabilidade interanual, que eram mais evidentes na África Meridional. As primeiras componentes mostraram uma forte relação entre o índice de oscilação sul, anomalias da temperatura da superfície do mar do Pacífico, e anomalias de ROL. Os resultados obtidos mostraram um padrão de teleconexão entre as condições climáticas na bacia do oceano Pacífico, e a condição da vegetação em localizações regionais específicas sobre a África. Eles concluíram também que as características espaciais e a alta resolução temporal dos dados, oferecem uma boa oportunidade para mapear em escala regional as áreas que sofrem os impactos do ENSO.

Em estudos realizados no sul da África, Richard e Pocard (1998), constataram a existência de uma forte correlação ($R = 0,81$) de valores de NDVI mensal com a precipitação bimensal. O tempo de resposta observado foi de um a dois meses. Utilizando ACP e análise de agrupamento, eles verificaram que ocorre uma maior sensibilidade do NDVI às variações sazonais de precipitação, nas regiões onde a média anual varia entre 300 e 900 mm e em regiões onde existe um forte contraste entre a estação seca e a úmida. Eles encontraram também que a sensibilidade às anomalias interanuais na precipitação ocorre somente em áreas relativamente secas, onde a média anual varia entre 300 e 500 mm.

Liu et al. (1991), utilizaram dados de NDVI obtidos de imagens AVHRR/NOAA no modo GAC (Global Area Coverage), no período de junho de 1981 a agosto 1987 sobre a América do Sul. A evolução mensal do NDVI para anos secos e úmidos do período de estudo, foi utilizada para estimar as áreas com cobertura de NDVI menores que 0,23. Este valor foi usado como um indicador de áreas secas, e como delimitador de áreas de baixa precipitação no continente. Foram observadas dependências regionais bem definidas, com a variabilidade de áreas secas no nordeste, sudoeste e noroeste do continente e na região amazônica. Isto é constatado nas áreas com NDVI menores que 0,233 para os anos 1982/83 e 1984/85. Eles verificaram que na maioria das regiões, o NDVI demora cerca de um mês para responder à precipitação, ou seja, a maior correlação entre o NDVI e a quantidade de precipitação ocorre quando ele é comparado com a precipitação do mês anterior. Esse estudo também mostrou que a distribuição continental de vegetação com estresse, indicada pelo NDVI, corresponde a áreas que sofreram impactos de seca provocados pelo El Niño.

No Brasil, Batista et al. (1997), analisaram a composição mensal do NDVI (AVHRR/NOAA) da região amazônica, para o período de agosto de 1981 a junho de 1991. Eles averiguaram que os tipos de vegetação dominantes podem ser diferenciados, e que é possível identificar variações da cobertura vegetal associadas a mudanças climáticas. Os tipos de vegetação observados incluíram floresta densa, floresta aberta, floresta de transição, caatinga e dois tipos de cerrado. As composições mensais de NDVI revelaram uma forte sazonalidade no cerrado e especialmente na caatinga, enquanto que os demais tipos de cobertura florestal mostraram uma pequena variação através dos anos. As composições anuais de NDVI mostraram uma clara e significativa redução nos anos secos, associada ao evento ENSO. Os resultados obtidos sugerem o uso dos dados multitemporais de NDVI, para caracterização ambiental e identificação de ecossistemas florestais. Os resultados também demonstraram que estes dados devem ser usados com precaução, especialmente em relação a interferências atmosféricas, tais como, contaminação por nuvens e erupções vulcânicas, além das mudanças de calibração do sensor.

Barbosa (1998), avaliou composições mensais do período de 1982 a 1985 de NDVI provenientes das imagens AVHRR/NOAA e totais mensais de precipitação do nordeste do Brasil. Ele mostrou que as distribuições espacial e temporal do NDVI e a precipitação mensal na região, têm padrões semelhantes e são estatisticamente correlacionados. Desta forma, o NDVI poderia ser utilizado como indicador de regime pluviométrico no nordeste brasileiro.

Almeida e Batista (1998), analisaram a relação entre precipitação e NDVI derivado de dados AVHRR, na bacia do rio Amazonas, no período de janeiro de 1982 a dezembro de 1990. Eles encontraram uma baixa correlação entre NDVI e precipitação, e um *lag* de dois meses como tempo de resposta entre precipitação e o NDVI.

CAPÍTULO 3

DADOS E METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A análise da relação entre o comportamento do NDVI e as variações climáticas sobre o Brasil foram baseadas em dois conjuntos de dados, de NDVI e de ROL, obtidos através de imagens do AVHRR/NOAA.

Os dados de NDVI abrangem todo o território brasileiro (Figura 3.1a). No caso dos dados de ROL, definiu-se uma janela compreendida entre as latitudes de 35°N e 35°S, e as longitudes 10°E e 20°W (Figura 3.1b). Esta ampla área propicia uma visão global da dinâmica das oscilações climáticas que influenciam o Brasil.

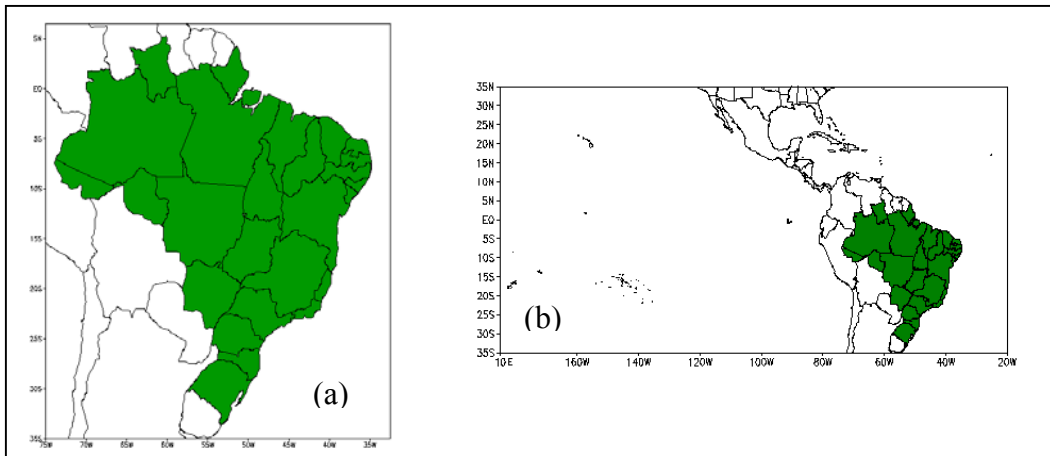


Fig. 3.1 - Áreas de estudo para: (a) dados de NDVI, o território brasileiro e (b) dados de ROL janela de latitudes 35°N a 35°S e longitudes 10°E a 20°W.

A visualização e a manipulação dos dados foram feitas utilizando-se:

- a) a rotina *Grid Analysis and Display System* (GRADS), fornecida pelo *Center for Ocean-Land-Atmosphere-Interactions* (COLA); informações completas sobre esta rotina podem ser encontradas em Doty (1992);
- b) o sistema *Environment for Visualizing Images* (ENVI); descrições detalhadas deste sistema encontram-se em ENVI (1999);

- c) o aplicativo estatístico SAS; informações adicionais deste aplicativo pode ser encontradas em SAS (1988), e;
- d) os softwares Excel e Word.

3.2 DADOS UTILIZADOS

Para a realização do presente trabalho foram utilizados os conjuntos de dados de NDVI e ROL. Uma descrição detalhada sobre estes dados encontra-se nos itens abaixo.

3.2.1 IMAGENS NDVI DO AVHRR/NOAA

O conjunto de imagens de NDVI utilizado foi produzido pelo Grupo de Estudos de Monitoramento e Modelamento do Inventário Global - *Global Inventory Modeling and Monitoring Study* (GIMMS) da *Goddard Space Flight Center/National Aeronautics & Space Administration* (GSFC/NASA). Essas imagens são composições mensais, disponibilizadas com resolução espacial de 8 km x 8 km, na projeção Goode Interrupted Homolosine, em formato de 8 bits, com 128 de *offset* e 0,008 de ganho e abrange o período de 1982 a 1993. Os dados cobrem toda a América do Sul e as informações relativas aos oceanos e aos grandes corpos d'água estão mascaradas com valor um. Informações completas sobre estes dados podem ser encontradas em Goddard (1999).

Os dados de entrada para o cálculo do NDVI, provenientes do GIMMS, são os dados originais GAC com resolução de 4 km. Inicialmente estes dados são organizados por continentes, e as informações relativas ao oceano são omitidas. Numa etapa posterior são eliminados os dados afetados por contaminação de nuvens, espalhamento e absorção devido à atmosfera (exceto absorção por ozônio) e visadas fora do nadir, com ângulos maiores que 25°. Os números digitais dos canais 1 (visível) e 2 (infravermelho próximo) do AVHRR são então convertidos em valores de reflectância usando-se os parâmetros de calibração de pré-lançamento fornecidos pela NOAA. Em seguida, o NDVI é calculado utilizando-se a equação 2.1. Os dados diários de NDVI são mapeados usando os dados de navegação do satélite e reamostrados para 8 Km x 8 km. A composição

mensal é gerada através da seleção do valor mais alto de NDVI de cada pixel, no período de 30 dias (Holben, 1986; Los et al., 1994 e Barbosa, 1998).

3.2.2 RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS (ROL)

Os dados de ROL utilizados neste trabalho, fazem parte dos conjuntos de dados meteorológicos disponibilizados pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Estes dados estão em formato de média mensal, organizados em pontos de grade com resolução espacial de 2,5° x 2,5° de latitude/longitude e em formato binário de 8 *bits*. Os dados cobrem todo o globo terrestre para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1995, porém o período utilizado foi de janeiro de 1982 a dezembro de 1993. Detalhes sobre esses dados encontram-se em Kalnay et al. (1996).

O cálculo da ROL é feito a partir de medições radiométricas obtidas pelo sensor AVHRR/NOAA em diversas bandas (Waliser e Zhou, 1997). O procedimento para obtenção e processamento dessa variável foi documentado por Gruber e Krueger (1984), Ohring et al. (1984) e Janowiak et al. (1985). Os dados de ROL utilizados, em unidades de wm^{-2} , foram selecionados exclusivamente pelos satélites com passagem à tarde (horário de cruzamento no equador 14:30). O seu valor é obtido através da média do fluxo de ROL em uma janela de 2,5° x 2,5° de latitude/longitude (Kalnay et al., 1996).

3.2.3 INDICADORES CLIMÁTICOS DO ENSO

As evidências e as características do ENSO foram obtidas através de dois indicadores, o Índice de Oscilação Sul (IOS) e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) de três regiões do oceano Pacífico conhecidas como: Niño 1+2, Niño 3 e Niño 4. Esses índices encontram-se disponíveis no *Climate Analysis Center da National Meteorological Center* (CAC/NMC).

A TSM é obtida através das médias mensais das áreas do Niño 1+2 que se localiza no Pacífico Leste (0°-10°S e 90°W-80°W), do Niño 3 que se localiza no Pacífico Central (5°N-5°S e 150°W-90°W) e do Niño 4 que se localiza no Pacífico Oeste (5°N-5°S e 160°E-150°W) (Trenberth, 1997).

O IOS é uma medida de fase e amplitude da oscilação sul, a qual descreve as variações de pressão entre o oceano Pacífico Leste e a Indonésia. A oscilação sul pode ser considerada como o mais importante fenômeno de larga escala que está associada às variabilidades interanuais nas regiões tropicais (Kousky e Cavalcanti, 1984; Trenberth, 1997). O IOS é obtido através da diferença padronizada da pressão ao nível do mar, entre o Pappete, no Tahiti, e Darwin, na Austrália. Inicialmente obtêm-se a anomalia padronizada da pressão mensal de Pappete e de Darwin.

$$\text{Anomalia Padronizada de Pappete} = \frac{(\text{Pressão Mensal de Pappete} - \text{Pressão Média de Pappete})}{\text{Desvio Padrão de Pappete}}$$

$$\text{onde, o Desvio Padrão de Pappete} = \sqrt{\frac{\text{Soma de todas as anomalia de Pappete}}{\text{número de meses}}}$$

O mesmo calculo é aplicada para os dados de Darwin. A seguir se obtêm-se o IOS.

$$\text{IOS} = [\delta (\text{Pappete}) - \delta (\text{Darwin})] / \sigma \quad (3.1)$$

onde δ (Pappete) é a anomalia padronizada de pressão mensal de Pappete; δ (Darwin) é a anomalia padronizada de pressão mensal de Darwin; e σ é o desvio padrão mensal das diferentes estações.

Anomalias negativas acentuadas de IOS indicam a ocorrência do fenômeno El Niño, enquanto que as anomalias positivas correspondem a ocorrência do fenômeno La Niña. O El Niño também é caracterizado pela TSM acima do normal no Pacífico Oeste, sendo então conhecido como evento quente; o oposto ocorre com o fenômeno La Niña que também é conhecido como evento frio. O IOS, assim como a TSM, têm sido amplamente utilizado como parâmetro para diagnosticar a variabilidade climática nos trópicos (Trenberth, 1997).

3.3 METODOLOGIA

Os estudos sobre as conexões entre o NDVI e as variabilidades climáticas sobre o Brasil envolveram duas etapas. Na primeira obteve-se as médias mensais e sazonais e as

anomalias anual de ROL e NDVI. Na segunda etapa aplicou-se as técnicas estatísticas de análise por componentes principais sobre os dados de ROL e NDVI, e a análise de agrupamento sobre os dados de NDVI. Os resultados da primeira etapa foram utilizados para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos posteriormente. A Figura 3.2 ilustra a sequência dos procedimentos realizados nas etapas citadas.

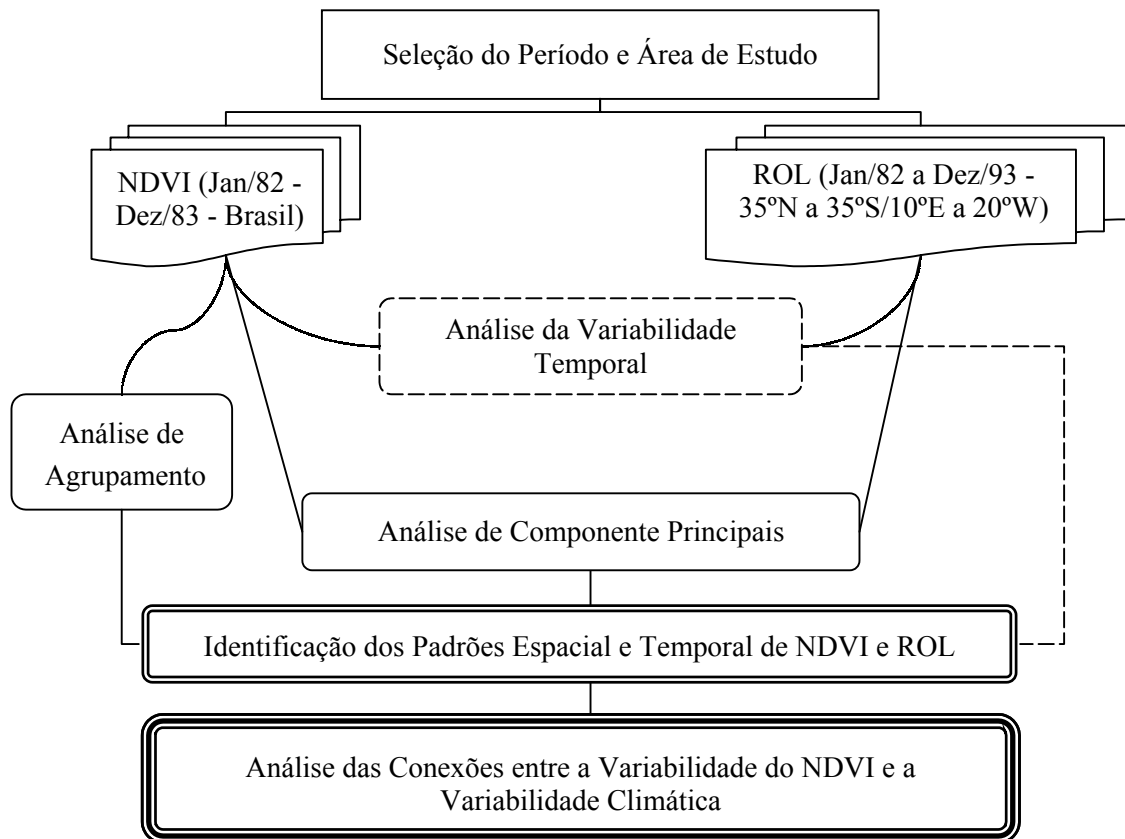


Fig. 3.2 - Diagrama do procedimento de análise das conexões entre o NDVI e a variabilidade climática sobre o Brasil.

3.3.1 MÉDIAS E ANOMALIAS DE NDVI E ROL

Foram obtidas a média mensal e sazonal dos dados de ROL e NDVI e a anomalia anual de ROL. Esses dados foram utilizados para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos nas análises de agrupamento e das componentes principais.

Os dados de ROL utilizados para a obtenção das médias e das anomalias são as médias mensais de janeiro de 1982 a dezembro de 1993 (totalizando 144 meses), da área que se

estende de 35°N a 35°S e 10°E a 20°W. Os dados de NDVI são composições mensais e cobrem o mesmo período de ROL. As médias e as anomalias de ROL foram obtidas utilizando-se o aplicativo GRADS e as do NDVI foram processadas pelo sistema ENVI. A seguir estão descritas as etapas de obtenção das médias e anomalias:

- a) separação dos anos e da área de estudo dos dados de ROL, através do aplicativo GRADS;
- b) definição da área de estudo do NDVI a partir da aplicação de uma máscara do território brasileiro, sobre as 144 imagens de NDVI da América do Sul, no sistema ENVI. Essa máscara foi obtida através de um mapa vetorial do Brasil que está disponível no banco de dados “Atlas” do software SPRING (INPE, 1999);
- c) obtenção das médias mensais, para cada mês do conjunto de dados. Os resultados estão nos Apêndices A e B;
- d) obtenção das médias sazonais relativas a cada estação do ano para a ROL. Para o cálculo da média do verão utilizou-se os meses de janeiro, fevereiro e março, para a do outono os meses de abril, maio e junho, para a do inverno os meses de julho, agosto e setembro e para a da primavera os meses de outubro, novembro e dezembro. Os resultados são apresentados e discutidos no tópico 4.1.2;
- e) cálculo da anomalia anual de ROL. Para o cálculo dessas anomalias, inicialmente obteve-se a média total dos 144 meses, posteriormente realizou-se a média de cada ano e a seguir subtraiu-se a média total da média de cada ano, obtendo-se assim 12 imagens de anomalias anuais. Os resultados estão no Apêndice A.

3.3.2 ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

A Análise por Componentes Principais (ACP), é uma técnica de estatística multivariada muito útil na investigação de relações existentes entre um conjunto de variáveis correlacionadas. Através da ACP, pode-se transformar um conjunto de dados, inicialmente correlacionados em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas. O

novo conjunto é obtido através de combinações lineares das variáveis originais, de tal forma que a maior parte das informações concentra-se nas primeiras componentes.

Uma das características da ACP é diminuir o número de variáveis correlacionadas em um determinado conjunto de dados, preservando a sua variância total. Isto permite identificar os padrões e processos físicos associados às variáveis observadas, possibilitando a interpretação dos dados num contexto que envolve a sua variabilidade espacial/temporal. Além disso, esta técnica tem sido utilizada para comprimir e codificar dados, realçar imagens e detectar mudanças digitalmente (Fung e LeDrew, 1987 e Eklundh e Singh, 1993).

A ACP tem sido bastante utilizada em aplicações de sensoriamento remoto e meteorologia, onde também é conhecida como Funções Ortogonais Empíricas - *Empirical Orthogonal Functions* (EOF). Geralmente são utilizados dois tipos de componentes principais, a componente principal não-padronizada e a componente principal padronizada. No primeiro caso utiliza-se a matriz de variância-covariância para se obter os autovalores e os autovetores, enquanto que no segundo, utiliza-se a matriz de correlação. O uso da matriz de correlação faz com que cada variável tenha o mesmo peso na obtenção das novas componentes (Haan, 1977; Richman, 1986 e Eastman e Fulk, 1993).

3.3.2.1 ASPECTOS MATEMÁTICOS DA ACP

O cálculo da ACP envolve essencialmente as seguintes etapas (Haan, 1977; Richards, 1986 e Wilks, 1995):

- a) obtenção da matriz de variância-covariância ou correlação;
- b) cálculo dos autovalores e autovetores;
- c) transformação linear dos conjuntos de dados, e;
- d) obtenção dos *loadings*.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{M-1} (\mathbf{F} \mathbf{F}^T) \quad (3.5)$$

onde, \mathbf{F}^T é a matriz transposta de \mathbf{F} .

O total da variância, V , é definido como a soma da variância de cada variável original e pode ser estimada por

$$V = \text{Traço de } \mathbf{S} = \sum_{i=1}^M s_{ii}. \quad (3.6)$$

Para se obter a matriz de correlação, inicialmente define-se uma matriz diagonal \mathbf{D} de dimensão $P \times P$, tal que o i -ésimo elemento da diagonal principal de \mathbf{D} , seja dado pela raiz quadrada do i -ésimo elemento da diagonal principal de \mathbf{S} , a matriz de variância-covariância. A partir daí obtém-se a matriz de correlação, \mathbf{R} , de dimensão $P \times P$, dada por:

$$\mathbf{R} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{S} \mathbf{D}^{-1} \quad (3.7)$$

onde, \mathbf{D}^{-1} é a inversa de \mathbf{D} .

Uma vez obtida a matriz de variância-covariância ou de correlação determinam-se os autovalores e autovetores associados a uma dessas matrizes. Os autovalores e os autovetores de uma matriz \mathbf{S} são P escalares e um vetores não nulos \mathbf{E} de dimensão $P \times 1$ que satisfazem a relação:

$$\mathbf{S} \mathbf{E} = \lambda \mathbf{E} \quad (3.8)$$

ou

$$(\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

onde \mathbf{I} é a matriz identidade de ordem P e $\mathbf{0}$ o vetor nulo $P \times 1$. Como \mathbf{E} é não nulo, segue que:

$$|\mathbf{S} - \lambda\mathbf{I}| = 0 \quad (3.10)$$

Como \mathbf{S} é uma matriz simétrica, os autovetores desta serão ortogonais, ou seja:

$$\mathbf{E}^T \mathbf{E} = \mathbf{I} \quad (3.11)$$

Assim, para que \mathbf{E} tenha soluções não triviais o $\det |\mathbf{S} - \lambda\mathbf{I}| = 0$, ou seja:

$$|\mathbf{S} - \lambda\mathbf{I}| = \begin{vmatrix} \mathbf{s}_{11} - \lambda & \mathbf{s}_{12} & \mathbf{s}_{13} & \cdots & \mathbf{s}_{1P} \\ \mathbf{s}_{21} & \mathbf{s}_{22} - \lambda & \mathbf{s}_{23} & \cdots & \mathbf{s}_{2P} \\ \mathbf{s}_{31} & \mathbf{s}_{32} & \mathbf{s}_{33} - \lambda & \cdots & \mathbf{s}_{3P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{s}_{P1} & \mathbf{s}_{P2} & \mathbf{s}_{P3} & \cdots & \mathbf{s}_{PP} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.12)$$

O determinante acima gera uma “equação característica”, que é uma equação algébrica em λ de grau P cujas raízes são $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_P$. Cada autovalor λ_i , explica uma fração da variância total. Logo, a soma dos autovalores define a variância total dos dados.

O autovetor \mathbf{e}_i , associado ao autovalor λ_i , é dado por:

$$(\mathbf{S} - \lambda_i)\mathbf{e}_i = 0 \quad i = 1, \dots, P \quad (3.13)$$

Da equação acima resulta um sistema de P equações em P incógnitas ($\mathbf{e}_{1i}, \mathbf{e}_{2i}, \dots, \mathbf{e}_{Pi}$), onde \mathbf{e}_i é um vetor $P \times 1$.

Após a obtenção dos autovalores e autovetores, calcula-se a nova matriz de dados, \mathbf{C} , que é obtida utilizando-se a equação 3.2:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^T \mathbf{F} \quad (3.2)$$

onde, \mathbf{A}^T é a matriz transposta dos autovetores, sendo que a matriz \mathbf{A} , $P \times P$, pode ser escrita como:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{11} & \mathbf{e}_{12} & \mathbf{e}_{13} & \cdots & \mathbf{e}_{1P} \\ \mathbf{e}_{21} & \mathbf{e}_{22} & \mathbf{e}_{23} & \cdots & \mathbf{e}_{2P} \\ \mathbf{e}_{31} & \mathbf{e}_{32} & \mathbf{e}_{33} & \cdots & \mathbf{e}_{3P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{e}_{P1} & \mathbf{e}_{P2} & \mathbf{e}_{P3} & \cdots & \mathbf{e}_{PP} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

A matriz \mathbf{C} , é formada por elementos não correlacionados entre si, em razão da ortogonalidade dos vetores. Os elementos dessa matriz, \mathbf{C} , recebem o nome de componentes principais, sendo que cada linha representa uma componente. Desta forma obtém-se P componentes com M valores.

Após a obtenção da matriz de componentes principais pode-se determinar os *loadings*, que são as correlações entre as componentes principais e a série original dos dados. Os *loadings* podem ser usados para selecionar quais componentes são importantes para a explicação da variância de dada variável. Se uma componente tem alta correlação com uma variável, então esta componente é importante para explicar parte da variância desta variável. Para fins de interpretação, pode-se usar os coeficientes das componentes em lugar dos *loadings*. Em síntese, os *loadings* são os coeficientes das componentes padronizados multiplicados pela raiz quadrada dos autovalores (*loadings* = coeficiente da componente * $\sqrt{\text{autovalores}}$), (Sansigolo, 1999).

Há de se ressaltar que o tamanho da matriz das componentes, dos autovetores e dos *loadings* depende da forma como os dados estão organizados na matriz de entrada, conforme ilustrado na Figura 3.3. Em sensoriamento remoto (imagens) o modo mais utilizado é o T (temporal), onde no “tempo” tem-se os canais espectrais ou séries temporais e no “espaço” os pixels. Em meteorologia (estações meteorológicas) o modo S (espacial) é o mais utilizado onde no “espaço” tem-se os pontos de grades ou estações meteorológicas e no “tempo” as séries temporais. Esta diferença ocorre porque o modo T é usado para estudar os padrões temporais de variabilidade, com o propósito de eliminar a correlação temporal entre os dados. O modo S é usado para estudar os padrões espaciais de variabilidade com o objetivo de eliminar a correlação espacial entre as variáveis. Em geral os dados são correlacionados no espaço e no tempo. No

caso de meteorologia quando se tem sinais temporais anuais, a maior correlação é no espaço por isso se utiliza mais o modo S. No caso de sensoriamento remoto utiliza-se imagens diárias, semanais ou mensais nas quais a maior correlação é no tempo, daí a razão para utilizar o modo T (Sansigolo, 1999).

Modo	Matriz de Dados	Matriz de Covariância ou Correlação	Matriz de Componentes Principais	Matriz de Autovetores	Matriz de Loading
S	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Espaço</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Tempo 1... M ⋮ P </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Espaço</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Espaço 1... P ⋮ P </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Espaço</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Tempo 1... M ⋮ P </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Espaço</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Espaço 1... P ⋮ P </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Espaço</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Espaço 1... P ⋮ P </div> </div>
T	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Tempo</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Espaço 1... P ⋮ M </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Tempo</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Tempo 1... M ⋮ M </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Tempo</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Espaço 1... P ⋮ M </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Tempo</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Tempo 1... M ⋮ M </div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Tempo</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Tempo 1... M ⋮ M </div> </div>

Fig. 3.3 - Formas de entrada e saídas dos dados em ACP.
 FONTE: Adaptada de Richman (1986, p.315).

Apesar dos dados utilizados (NDVI e ROL) apresentarem correlações tanto espaciais quanto temporais e o objetivo do trabalho ser a análise espacial e temporal dos dados, optou-se por utilizar o modo temporal de ACP. Diversos problemas surgiram ao manipular os dados de NDVI pelo modo espacial. Como por exemplo, houve a necessidade de degradar a resolução dos dados de 8 km para 64 km, para efetuar os cálculos, pois o volume de dados manipulados era muito grande para o equipamento utilizado. Esta degradação resultou em perda de informações, além de outros problemas. Optou-se também por realizar os cálculos da ACP utilizando a matriz de correlação, modo padronizado, pois este é o mais indicado quando se dispõe de grande número de imagens (Eastman e Fulk, 1993).

3.3.2.2 ACP DOS DADOS DE ROL

Os dados de ROL utilizados na ACP são médias mensais de janeiro de 1982 a dezembro de 1993, totalizando 144 meses, e possuem uma área de 35°N a 35°S e 10°E a 20°W. A análise destes dados envolveu os seguintes processamentos:

- a) importação dos dados de ROL que estavam disponibilizados no GRADS para o ENVI;
- b) análise de componentes principais através da matriz de correlação, realizada no ENVI;
- c) manipulação dos gráficos de autovetores através do software Excel, e;
- d) obtenção das imagens de componentes principais pelo GRADS.

3.3.2.3 ACP DOS DADOS DE NDVI

Os dados de NDVI utilizados na ACP são as composições mensais de janeiro de 1982 a dezembro de 1993, que totalizam 144 imagens de todo o território brasileiro. A análise destes dados envolveu os seguintes procedimentos:

- a) análise de componentes principais através da matriz de correlação, realizada no ENVI;
- b) manipulação e obtenção das imagens componentes através do ENVI, e;
- c) manipulação e obtenção dos gráficos de autovetores a partir do software Excel.

Vale esclarecer que neste trabalho utilizou-se os coeficientes das componentes principais (imagens componentes) para se realizar a interpretação dos dados, pois o sistema ENVI, utilizado para realizar a ACP não efetua o cálculo dos *loadings*.

3.3.3 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

As técnicas de classificação, dentre as quais figura a análise de agrupamento, tem suas origens na idade antiga. O seu desenvolvimento se deu ao longo do tempo, em especial nas áreas biológicas (chaves de classificação de plantas e animais). Atualmente essas técnicas são utilizadas em todas as áreas do conhecimento humano sendo, em muitas ocasiões, complemento indispensável da análise de componentes principais (Judez Asensio, 1988).

Basicamente, as técnicas de classificação buscam arranjar um conjunto de objetos (observações) – cada um com múltiplos atributos (variáveis) - de forma a agrupar objetos próximos e separar os diferentes grupos de objetos. A medida da proximidade entre objetos é determinada pela análise simultânea de todos os atributos de cada objeto em relação aos demais, atributos estes que podem ser quantitativos ou qualitativos. Existem dois tipos de medidas de proximidade: as medidas de similaridade e as distâncias. As medidas de similaridade (e dissimilaridade) são especialmente adequadas quando os objetos são caracterizados por atributos qualitativos, sendo também conhecidas como coeficientes de associação. Já as distâncias, que são uma medida especial de dissimilaridade, são utilizadas quando se trabalha em um espaço métrico, ou seja, quando os objetos são caracterizados por atributos quantitativos.

As técnicas de classificação sofisticadas são utilizadas quando o objetivo é dividir um conjunto em determinado número de grupos, este conjunto não apresenta divisões naturais discerníveis, nem do ponto de vista dos objetos nem dos atributos. Caso exista uma divisão óbvia (devido a um pequeno número de objetos e atributos, ou a uma evidente dicotomia entre grupos presentes no conjunto estudado) a percepção humana direta é suficiente para a classificação, não sendo necessário o emprego de técnicas estatísticas sofisticadas. Entretanto, mesmo em conjuntos “bem comportados”, quando o número de objetos e, principalmente, o número de atributos cresce, fica impossível para o analista humano fazer uma classificação com base apenas nesta percepção direta, sendo então indicado o uso das técnicas de classificação.

Algumas destas técnicas permitem que um objeto seja classificado em mais de um grupo ao mesmo tempo, mas a maioria delas visa construir grupos disjuntos, ou seja, ao final cada objeto só pode pertencer a um único grupo. Neste último caso as técnicas podem ser divididas em duas grandes linhas: as hierárquicas e as de agrupamento.

As técnicas de classificação hierárquicas são aquelas cujo resultado é uma repartição dos objetos feita de tal maneira que pode ser representada por uma árvore (ou chave) de classificação. Nestes casos, como no exemplo (Figura 3.4) a seguir, objetos classificados nas extremidades de um mesmo ramo ou tronco de uma árvore, terão valores idênticos para pelo menos um dos atributos considerados na classificação (por exemplo: CBERS e LANDSAT tem órbitas polares). Numa interpretação livre, podemos dizer que os ramos das extremidades “herdam” algumas características (valores dos atributos) dos ramos dos quais provêm. Sendo assim, pode-se dizer: se todos os satélites Meteorológicos são geoestacionários e se o GOES e o METEOSAT são satélites Meteorológicos, então os dois são geoestacionários. Em suma, neste tipo de classificação, uma vez que o objeto ou indivíduo a ser classificado possua certo valor para um atributo (por exemplo: o satélite X tem órbita polar), os grupos aos quais ele poderá ser incorporado serão restritos àqueles derivados do ramo definido por este valor de atributo, ou seja, o satélite X, pelo valor assumido para o atributo já citado, é um satélite do grupo recursos terrestres e, portanto, no nosso exemplo ele pode ser o CBERS ou o LANDSAT, mas nunca o GOES ou o METEOSAT.

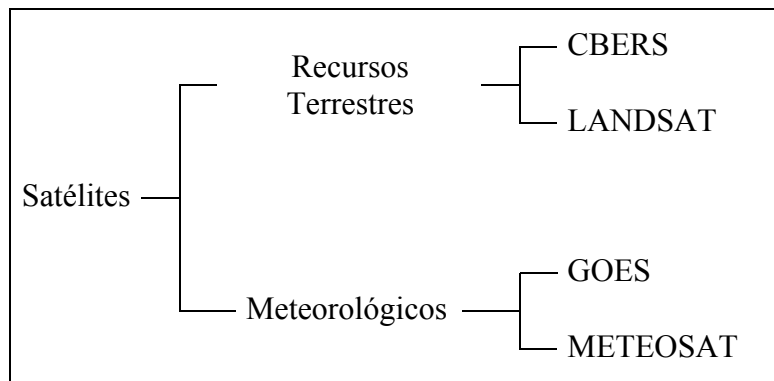


Fig. 3.4 - Exemplo de árvore (ou chave) de classificação utilizada em análise de agrupamento.

As técnicas hierárquicas são especialmente indicadas para casos onde há um forte componente determinístico influenciando a formação de grupos, como é o caso das árvores genealógicas e das chaves de classificação de plantas e animais. Nestes casos, a genética e a teoria da evolução das espécies, respectivamente, fornecem uma base científica muito sólida para o determinismo implícito nesta técnica. Entretanto, muitas vezes este componente determinístico está ausente ou é desconhecido, sendo então mais adequada uma abordagem probabilística, que é possível através do uso das técnicas não hierárquicas.

3.3.3.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DOS DADOS DE NDVI

A análise de agrupamento foi realizada no conjunto de dados de NDVI de janeiro de 1982 a dezembro de 1993, totalizando 144 imagens mensais, em uma janela de 6° N a 33°30'S e 34°30'W a 74°30'W sobre a América do Sul na faixa compreendida entre os extremos norte/sul e leste/oeste do Brasil. Porém, devido ao tamanho da área de estudo e também ao grande número de imagens, foi necessário fazer uma reamostragem do tamanho do pixel, passando-o de 8 km para 64 km, a fim de viabilizar a análise. Esta reamostragem foi realizada através da média de uma janela de 4 x 4 pixels. A intenção da análise de agrupamento foi verificar a possibilidade de se localizar no espaço geográfico, a partir dos dados de NDVI as grandes formações vegetais brasileiras e assim obter o comportamento temporal do NDVI dessas formações, além de tentar identificar os tipos de vegetação onde os efeitos das anomalias climáticas associadas ao fenômeno El Niño foram mais evidentes.

Pelo exposto, a técnica de classificação que mais se adequou ao objetivo de identificar regiões semelhantes quanto ao índice de vegetação, foi a análise de agrupamentos, utilizando a distância euclidiana como medida de proximidade. Isto se justifica porque, ao considerar que cada elemento de cena (ou pixel) de 64 km x 64 km, constitui um objeto e que os valores de NDVI, constituem os atributos quantitativos de cada um destes objetos, obtém-se uma massa de dados não passível de análise humana direta.

Na realidade, este volume de dados é tão grande que limita as possibilidades de escolha entre os inúmeros métodos e algoritmos disponíveis para realizar a tarefa de classificar objetos em grupos. Para atingir este objetivo foi utilizado um algoritmo de agrupamento

(clustering) chamado Fastclus, que é baseado na distância Euclidiana, do aplicativo SAS (SAS, 1988), onde a distância entre dois pixel \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 é dado por:

$$\mathbf{d}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2\| = \left\{ (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)^t (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \right\}^{1/2} = \left\{ \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_{1_i} - \mathbf{x}_{2_i})^2 \right\}^{1/2} \quad (3.15)$$

onde N é o número de imagens (Richards, 1986). Este procedimento é especialmente destinado a grandes conjuntos de dados, pois permite atingir os critérios de classificação estabelecidos pelo usuário.

Em um arquivo digital no formato ASCII, os dados foram arranjados na forma de uma matriz, na qual as linhas correspondiam aos elementos de cena (pixels) e as colunas aos valores de NDVI para cada um dos 144 meses considerados. Adicionalmente, foram levados em consideração os valores de latitude e longitude do centro de cada elemento de cena, normalizados para uma distribuição com parâmetros mais próximos daqueles encontrados nos dados de NDVI (média = 0,553 e desvio padrão = 0,162), compondo mais duas colunas de atributos. Os dados deste arquivo alimentaram o algoritmo escolhido, para o qual também foram fornecidos os parâmetros: número máximo de iterações = 50; valor do critério de convergência = 0,05; e número máximo de grupos = 9. Estabeleceu-se ainda que a escolha dos centros iniciais dos grupos seria feita de forma aleatória.

Cabe aqui um comentário sobre a definição do número de grupos e sobre a utilização dos dados de localização geográfica (latitude e longitude) como variáveis classificatórias na análise. A intenção da análise de agrupamento foi verificar a possibilidade de se localizar no espaço geográfico, a partir dos dados de NDVI, as grandes formações vegetais brasileiras. Qualquer tentativa de generalização leva necessariamente a uma simplificação da realidade mas, na escala de trabalho que possibilite uma visão sinótica de um país com as dimensões do Brasil, esta simplificação é mais que justificada. Por isso, considerou-se o estabelecimento do número máximo de nove grupos como uma simplificação satisfatória. Já a utilização da posição geográfica como fator de classificação visou dar um caráter regional aos grupos, ou seja, não parece haver muito sentido, por exemplo, em classificar como

cerrado um ou poucos pixels isolados dentro de uma região de caatinga, mesmo que os valores de NDVI deles sejam um pouco mais parecidos com o padrão do cerrado que com o da caatinga. Uma maneira suave de interferir nesse processo de classificação é inserir as variáveis latitude e longitude, devidamente normalizadas, de forma que no caso de um empate quanto a que grupo deve pertencer um pixel, a escolha recaia sobre o grupo mais presente na sua vizinhança geográfica.

Definidos os parâmetros exigidos pelo algoritmo, o processo se inicia com a definição de nove pixels, de forma aleatória, que servirão como centros dos nove grupos. A seguir, todos os demais pixels são divididos entre os grupos de forma que cada pixel seja classificado no grupo cujo centro esteja mais próximo dele, empregando para isso, como medida de proximidade, a distância euclidiana no espaço de atributos entre pixel e centro de grupo. Classificados todos os pixels, é calculado o valor do novo centro de cada grupo, que nada mais é que um ponto cujas coordenadas equivalem à média dos valores, para cada atributo, dos pixels daquele grupo. A medida usada como critério de convergência neste algoritmo é o valor máximo entre as distâncias dos novos centros dos grupos aos centros dos seus antecessores. As iterações param quando a mudança máxima do centro do grupo é menor ou igual ao valor fornecido como critério de convergência (0,05 neste caso). Como, dependendo do conjunto de dados, o critério de convergência pode exigir excessivas iterações para ser alcançado, estabeleceu-se também um número máximo de iterações, após o qual, mesmo sem atingir o critério de convergência, o procedimento é interrompido e o resultado apresentado. No caso presente limitou-se o número de iterações em 50, o que não foi atingido, pois o critério de convergência foi satisfeito com 25 iterações.

Uma vez classificados todos os elementos, foram então calculadas as médias de NDVI por grupo, de janeiro de 1982 a dezembro de 1993. Também foram obtidas as médias de cada mês, considerando o período de doze anos, e a média anual, sempre por grupo. Estes cálculos foram também realizados com o uso do aplicativo SAS. Os resultados foram formatados de maneira a alimentarem uma planilha eletrônica (Excel), na qual foram elaborados os gráficos, e também no sistema ENVI, no qual os dados foram organizados para a constituição de um cartograma.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS (ROL)

Os resultados das análises de ROL apresentados a seguir, têm como objetivo auxiliar a identificação dos padrões climáticos associados a ROL facilitando a análise das conexões entre o NDVI e o clima do Brasil. Estudos específicos envolvendo análises dos ciclos anual e interanual de ROL nos trópicos foram documentados por vários autores, como Heddinghaus and Krueger (1981); Aceituno (1988), Horel et al. (1989) e Kayano et al. (1995).

4.1.1 MÉDIAS DE ROL

Através das médias mensais para cada ano do período de estudo (1982-1993), obteve-se as médias sazonais de ROL, conforme descrito no tópico 3.3.1. Observando a Figura 4.1 é possível constatar que na primavera e no verão os valores mais baixos de ROL, associados à atividade convectiva, cobrem grande parte do território brasileiro. Essa característica ocorre devido à presença dos diversos sistemas de tempo que atuam em nosso continente. A faixa com valores baixos, na região equatorial, é decorrente da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é um dos principais sistemas meteorológicos que atua nos trópicos. Devido à sua estrutura física, a ZCIT tem se mostrado decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e de clima em diversas áreas desta região (Ferreira, 1996). Essa zona contribui para o transporte de umidade do oceano Atlântico para o continente, aumentando a precipitação em parte da região norte e nordeste do país; detalhes sobre este mecanismo podem ser encontrados em Uvo (1989).

A ZCIT apresenta um deslocamento meridional ao longo do ano, atingindo sua posição mais ao norte (8° N) durante o verão do Hemisfério Norte, e a sua posição mais ao sul durante o mês de abril. Além dessa oscilação anual, a ZCIT apresenta oscilações de maiores frequências, com períodos variando de semanas a dias. Além de influenciar no

tempo e no clima das áreas tropicais, a ZCIT também está envolvida na manutenção do balanço térmico global. Em escala planetária, a ZCIT está localizada no ramo ascendente da célula de Hadley, atuando no sentido de transferir calor e umidade dos níveis inferiores da atmosfera das regiões tropicais para os níveis superiores da troposfera e para as médias e altas latitudes (Ferreira, 1996).

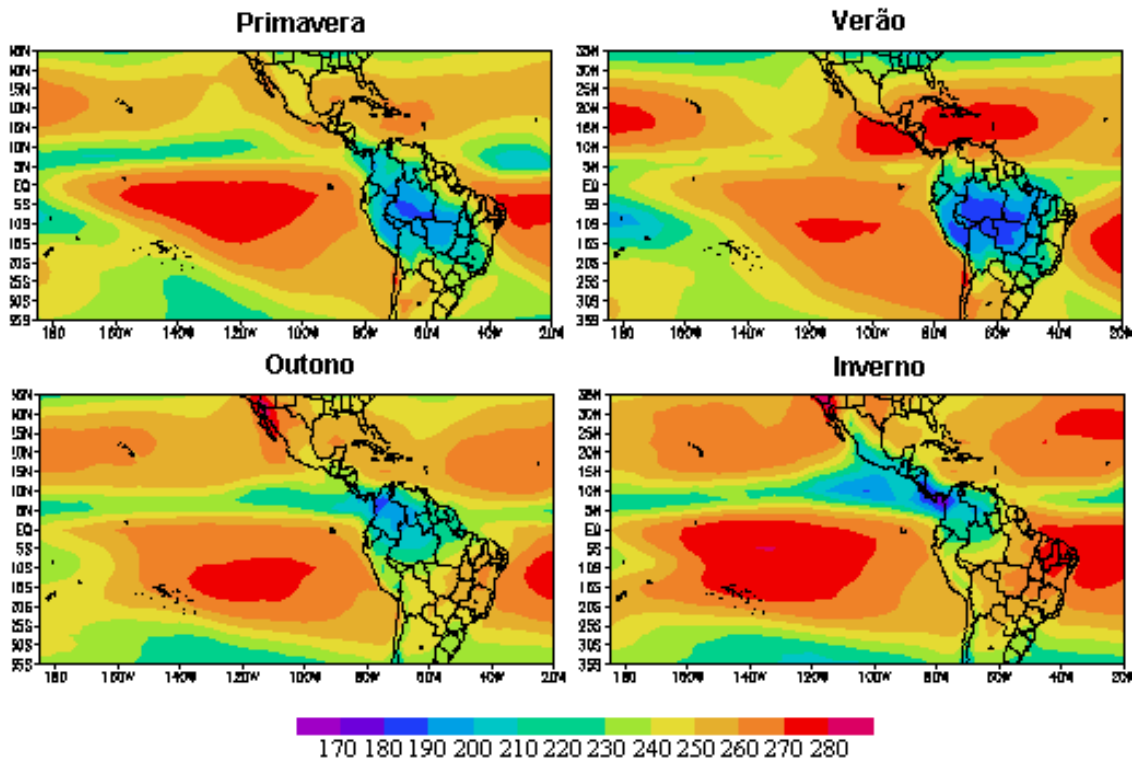


Fig. 4.1 - Média sazonal de ROL, em Watts/m², para o período de 1982 a 1993.

Observa-se também na primavera e no verão (Figura 4.1), uma banda de ROL com valores relativamente baixos e orientação NW/SE, estendendo-se do sul da região Amazônica até o oceano Atlântico Sudoeste. Esta banda de nebulosidade é denominada de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Ela é um dos mais importantes fenômenos de tempo na escala intra-sazonal, que ocorre durante o verão na América do Sul. A ZCAS é a responsável por episódios de estiagem prolongada e enchentes que atingem diversas regiões do país, tais como a sul e a sudeste. Ela é caracterizada pelas frentes frias que se formam no sul do continente que ao encontrarem com o ar tropical no sudeste e centro oeste ficam estacionadas aumentando a chuva durante o verão

(Kodama, 1993; Quadro, 1993 e Rocha e Gandu, 1996). Observa-se também na região amazônica valores de ROL bastante baixos e abrangentes. Neste caso, a convecção está associada a uma circulação anticiclônica de grande escala na alta troposfera chamada de Alta da Bolívia (Virji, 1981 e Figueroa, 1997).

No outono e no inverno (Figura 4.1) a atividade convectiva diminui e os valores de ROL sobre o Brasil aumentam consideravelmente devido à estabilidade atmosférica. Nesta época, a ZCIT desloca-se para o Hemisfério Norte, seguindo o movimento do sol e a ZCAS desaparece. Observa-se também que a faixa com valores relativamente baixos (210 a 230 Watts/m²) de ROL no sul do continente, desloca-se para o norte, atingindo a região sul do Brasil no seu máximo. Isto ocorre devido à queda da temperatura da superfície da Terra nesta época do ano.

4.1.2 ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS DE ROL

A interpretação dos resultados da Análise por Componentes Principais (ACP) padronizada, realizada no conjunto de dados de ROL e de NDVI é baseada na análise das imagens componentes e nos gráficos de autovetores. O gráfico de autovetores, que é uma série temporal, ilustra o peso de cada uma das 144 imagens na obtenção de cada imagem componente (coeficientes de cada componente). Por exemplo, se um mês apresenta um alto valor de autovetor indica que ele contém um padrão espacial muito semelhante ao representado pela imagem componente. Deve-se ressaltar, que quando o autovetor for negativo indica que este mês tem padrão inverso do demonstrado na imagem componente, ou seja, se o valor de ROL ou NDVI está aparecendo alto na imagem componente, na realidade, naquele mês ele foi baixo.

Para realçar a visualização dos dados foi aplicado um realce linear nas imagens componentes. Este realce foi efetuado de maneira a que os dados ficassem com uma distribuição simétrica em torno do valor zero. Desta forma é possível verificar a intensidade e a ocorrência dos valores positivos e negativos. Os valores positivos aumentam gradualmente do verde ao vermelho e os valores negativos do azul ao preto. Estes valores podem ser considerados como anomalias positivas ou negativas em relação à média mensal de ROL ou de NDVI. No caso da ROL quando ocorre uma

anomalia positiva há um aumento desta variável, ou seja diminuição de nuvens convectivas, e quando ocorre anomalia negativa há uma diminuição da ROL e consequentemente um aumento da atividade convectiva. Quanto mais fortes forem as anomalias, maior será a relação da região anômala com a série temporal.

4.1.2.1 ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE

A primeira componente do conjunto de dados de ROL, mostra o comportamento médio dessa variável durante o período considerado. Na Figura 4.2 observa-se a presença de forte subsidência nos oceanos Pacífico e Atlântico associada a altos valores de ROL. A ZCIT localiza-se em torno de 6° N, na vizinhança do equador meteorológico. Sobre a América do Sul, a atividade convectiva mais acentuada localiza-se sobre a Amazônia e a de menor convecção localiza-se sobre o nordeste do Brasil. A faixa de nebulosidade que se estende para o sudeste a partir da Amazônia, reflete a ZCAS ou a posição média das frentes frias. Os autovetores dessa componente (Figura 4.3) indicam que em anos de El Niño acentuado (1983, 1992) ocorrem variações no campo mensal de ROL, principalmente no início do ano. Esta componente explica 46,47% da variância total.

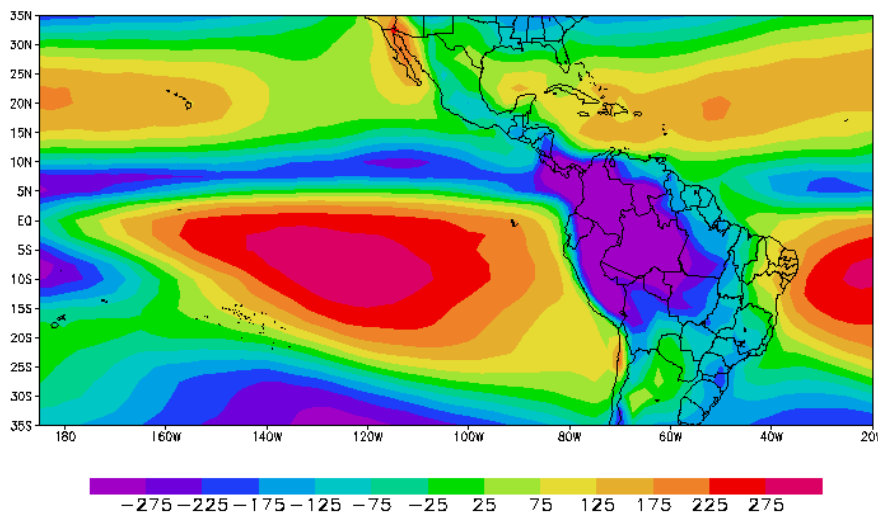


Fig. 4.2 - Primeira imagem componente da ACP de ROL.

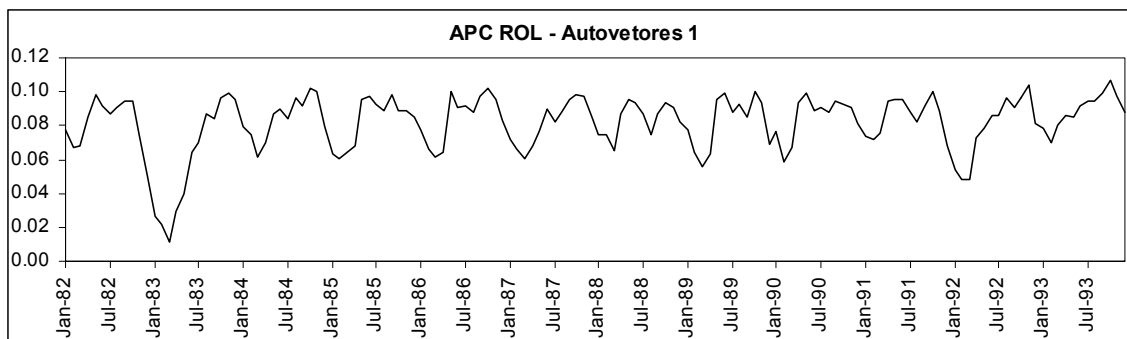


Fig. 4.3 - Autovetores da primeira componente de ROL.

4.1.2.2 ANÁLISE DA SEGUNDA COMPONENTE

A segunda componente de ROL (Figura 4.4) define muito bem o ciclo anual, conforme mostrado no gráfico dos autovetores (Figura 4.5). Esta componente representa 21,40% da variância total. Em função do domínio inter-hemisférico (Hemisférios Norte e Sul) utilizado, essa componente mostra o padrão de verão de cada hemisfério. Com auxílio das Figuras 4.4 e 4.5, observa-se que:

- a) durante o verão do Hemisfério Sul, a atividade convectiva é bastante acentuada sobre a Amazônia brasileira, tendo o seu máximo no mês de fevereiro. A atividade convectiva sobre a Amazônia interage com duas faixas de nebulosidade, a ZCAS que se estende para o Atlântico Sudoeste e a ZCIT ao longo do equador no oceano Atlântico. Observa-se também que a ZCAS é mais ativa sobre o continente;
- b) no verão do Hemisfério Norte, a atividade convectiva acentuada se localiza sobre a América Central e tem seu máximo em julho. A ZCIT nesta época situa-se em torno de 8° N, sofrendo pequenas descontinuidades, sendo mais ativa na América Central. No verão do Hemisfério Sul, a ZCIT localiza-se próxima ao equador, estando inativa principalmente no oceano Pacífico Equatorial Leste. A nebulosidade sobre o Pacífico Tropical Oeste está associada com a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS). A segunda componente revela que o modo verão é bem definido, sofrendo pouca variabilidade interanual e apresentando maior magnitude no verão austral.

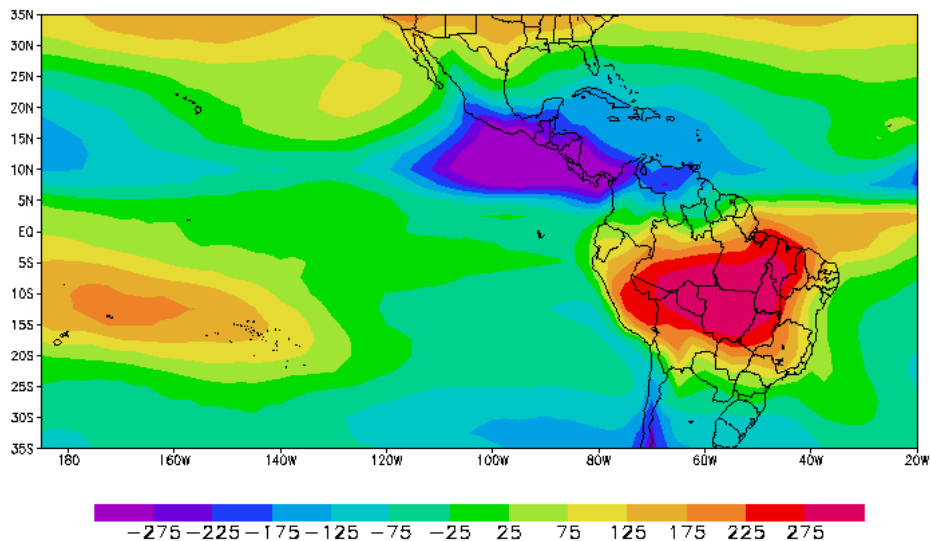


Fig. 4.4 - Segunda imagem componente da ACP de ROL.

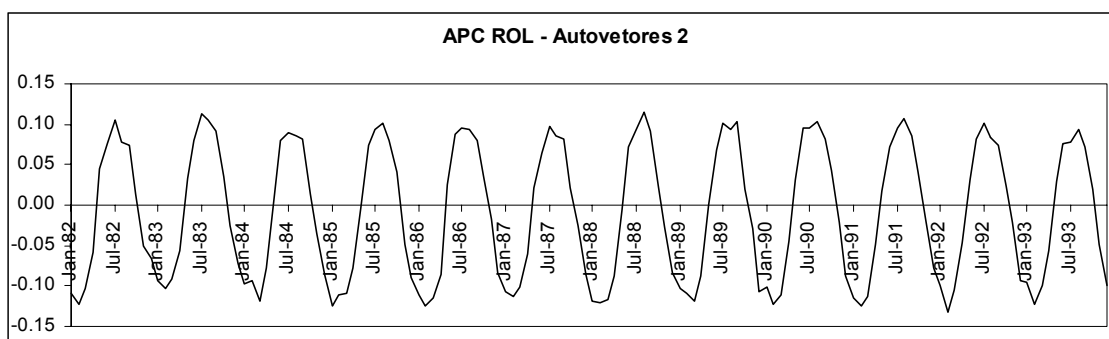


Fig. 4.5 - Autovetores da segunda componente de ROL.

4.1.2.3 ANÁLISE DA TERCEIRA COMPONENTE

A terceira componente (Figuras 4.6 e 4.7) reflete situações de primavera/outono porém associadas ao fenômeno El Niño. Sobre o oceano Pacífico Central (linha do equador) ocorre uma faixa convectiva bastante ativa, enquanto que na América do Sul encontra-se baixa atividade convectiva sobre o Brasil central e alta sobre o sul do continente. Isto evidencia a queda da precipitação que ocorre no norte e nordeste do Brasil e o aumento da precipitação no sul do país, quando há ocorrência do El Niño, conforme documentado por CPTEC (1998). Neste caso, o sinal da atividade convectiva no oceano Pacífico Central associado à variabilidade interanual, é maior que o ciclo anual (primavera/outono). Essa componente representa 9,76% da variância total.

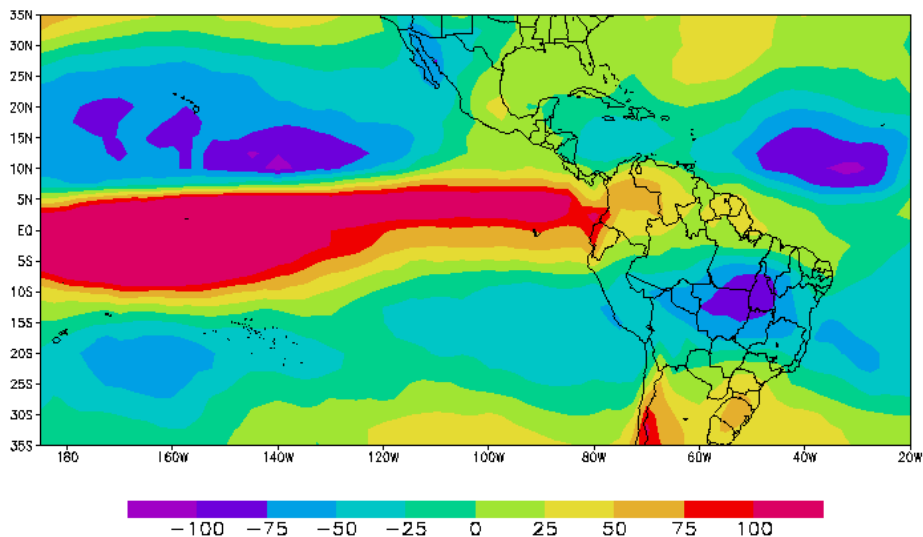


Fig. 4.6 – Terceira imagem componente da ACP de ROL.

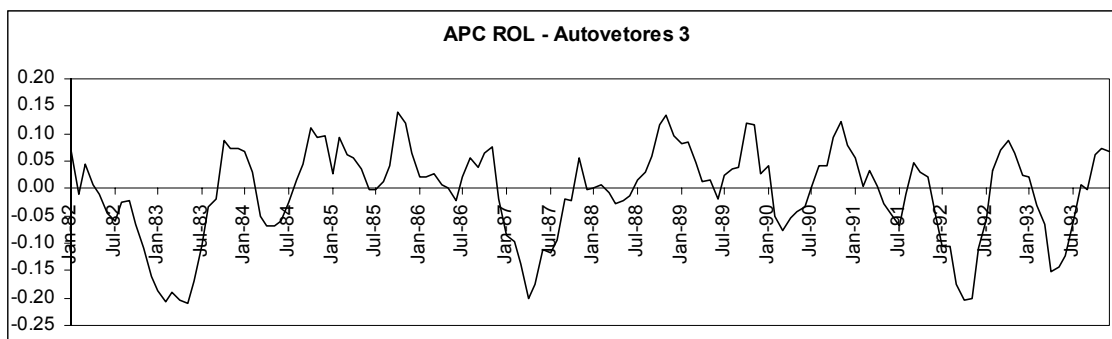


Fig. 4.7 - Autovetores da terceira componente de ROL.

Ao realizar uma correlação linear entre os autovetores da terceira componente e o Índice de Oscilação Sul (IOS) para o mesmo período, obteve-se um valor de correlação de $r = 0,56$ (significativo com $p < 0,05$ em todos os casos). Com a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Niño 1+2 obteve-se $r = -0,6295$, com a TSM do Niño 3 obteve-se $r = -0,8126$ e com a TSM do Niño 4 obteve-se $r = -0,3748$. Os valores de correlações encontrados indicam que há relação das variações da ROL registradas nesta componente com o fenômeno ENSO.

Embora a ROL não seja uma medida direta da temperatura ou da pressão da superfície do oceano (variáveis diretamente ligadas ao fenômeno ENSO), mas sim um valor que pode ser relacionado com a precipitação, a análise do seu comportamento espacial e

temporal, na região e no período estudado, permitiu a visualização de um padrão coincidente com o fenômeno ENSO. Isso indica que o uso de sensoriamento remoto, especificamente os dados do AVHRR/NOAA, em conjunto com a técnica estatística de análise de componentes principais, foi eficiente para o monitoramento de um fenômeno climático de ampla escala ao longo dos anos.

4.1.2.4 ANÁLISE DA QUARTA COMPONENTE

A quarta componente (Figura 4.8 e 4.9) revela o padrão primavera/outono do ciclo anual e representa 3,69% da variância total. No Hemisfério Sul, observa-se entre setembro e dezembro, uma faixa de nebulosidade que se estende do sul da Amazônia até o oceano Atlântico Sudoeste. Essa faixa de nebulosidade está associada a incursões equatoriais de frentes frias (Kousky, 1979), que nesta época do ano chegam até o sul da região nordeste, contribuindo para o regime de chuva nesta região. Nesta época, a ZCIT está localizada em torno de 8° N no Atlântico Norte e ao longo do equador no oceano Pacífico Oeste. Ao contrário do observado no modo de verão, a ZCIT sofre descontinuidades no Hemisfério Norte. Observa-se também que a ZCPS estende-se para o Pacífico Sudeste nas proximidades de 120° W. Por outro lado, entre abril e maio, a costa norte do Brasil é bastante influenciada pela precipitação associada à atividade convectiva ao longo da ZCIT enquanto que as regiões sul e sudeste tornam-se relativamente secas.

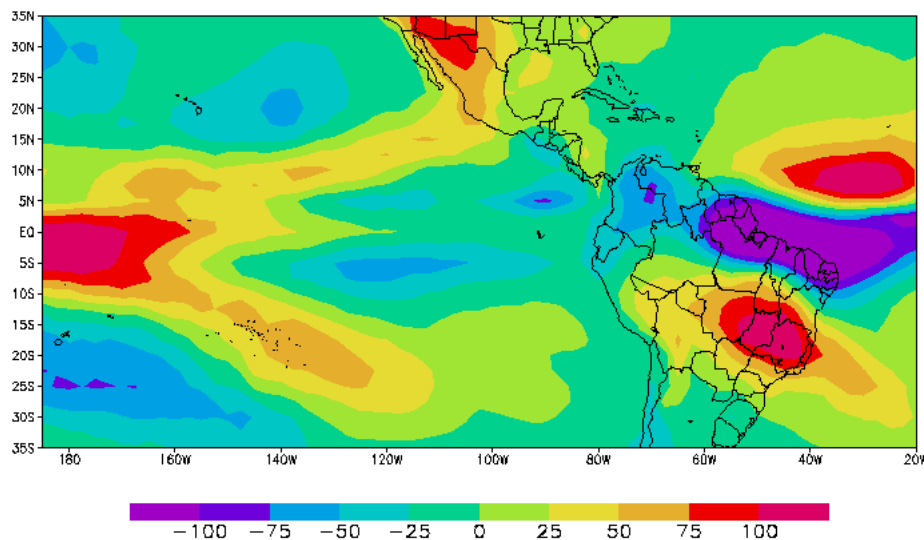


Fig. 4.8 - Quarta imagem componente da ACP de ROL.

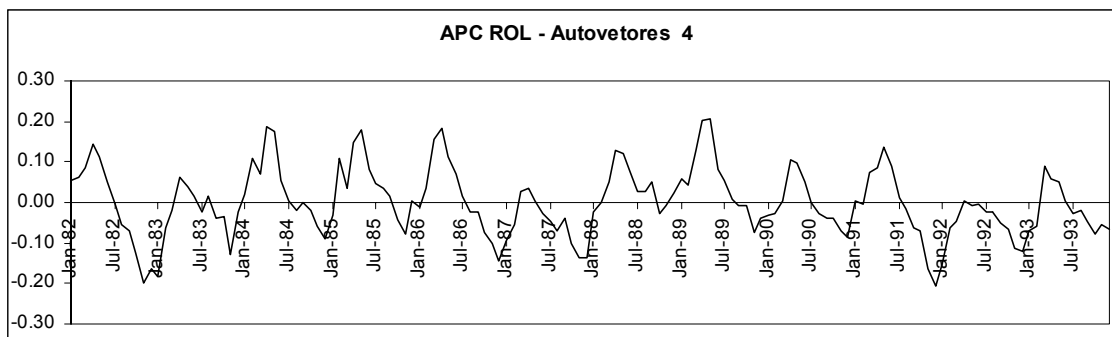


Fig. 4.9 - Autovetores da quarta componente de ROL.

Comparando-se com o modo verão, observa-se que o modo primavera/outono sofre variabilidade interanual acentuada, principalmente em eventos de El Niño. Na primavera austral, a magnitude dessa variabilidade é maior que na primavera boreal.

4.1.2.5 ANÁLISE DA QUINTA COMPONENTE

A quinta componente (Figuras 4.10 e 4.11) está associada ao ciclo semi-anual. Ele não apresenta significado físico evidente como no caso das outras componentes. Os picos positivos da série temporal ocorrem em dezembro/janeiro e julho e os negativos em abril/maio e outubro. A variabilidade interanual do ciclo semi-anual é relativamente regular, sofrendo pequenas alterações em anos de El Niño. Esta componente representa 2,15% da variância total.

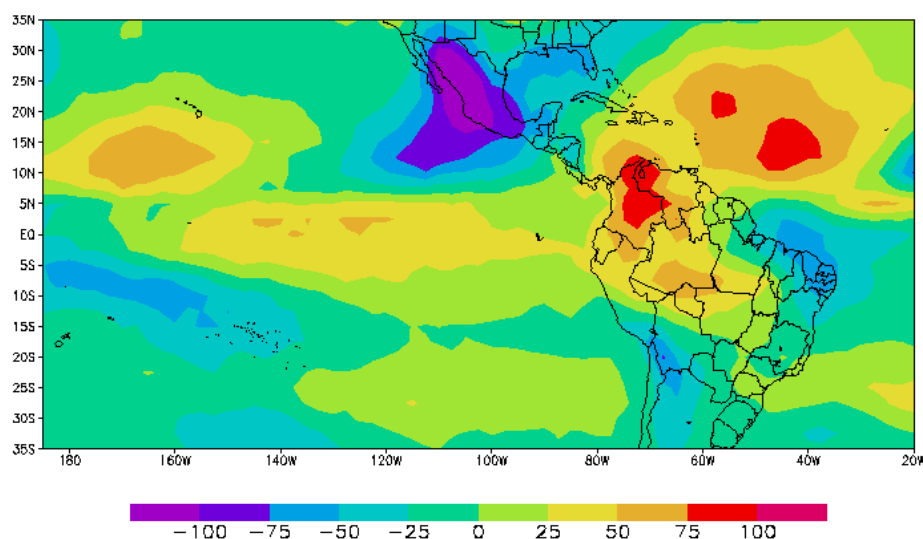


Fig. 4.10 - Quinta imagem componente da ACP de ROL.

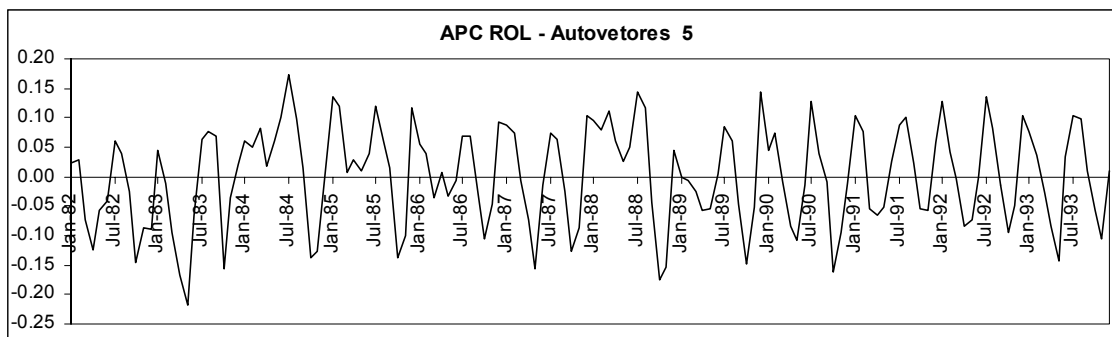


Fig. 4.11 - Autovetores da quinta componente de ROL.

Nenhuma das demais componentes apresentaram ciclos perceptíveis e nem significados físicos evidentes.

4.2 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

No que se refere aos dados de NDVI, foram realizados dois tipos de análise estatística: agrupamento e componentes principais. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos nos itens a seguir.

4.2.1 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DO NDVI

A análise de agrupamento realizada neste estudo teve o objetivo de verificar a possibilidade de se localizar no espaço geográfico, a partir dos dados de NDVI, as grandes formações vegetais brasileiras e assim obter o comportamento temporal do NDVI dessas formações.

A descrição da variabilidade da precipitação utilizada para a compreensão dos resultados da análise de agrupamento e da ACP realizada nos dados de NDVI foi baseada em Rao e Hada (1990), assim como nos resultados das análises obtidas com os dados de ROL.

A análise dos resultados obtidos na análise de agrupamento, foi baseada na interpretação dos nove grupos que estão ilustrados na Figura 4.12, comparando e relacionando-os a um ou mais tipos de vegetação, baseando-se no mapa de vegetação do Brasil (Figura 2.4). As análises de cada grupo serão apresentadas nos tópicos a seguir:

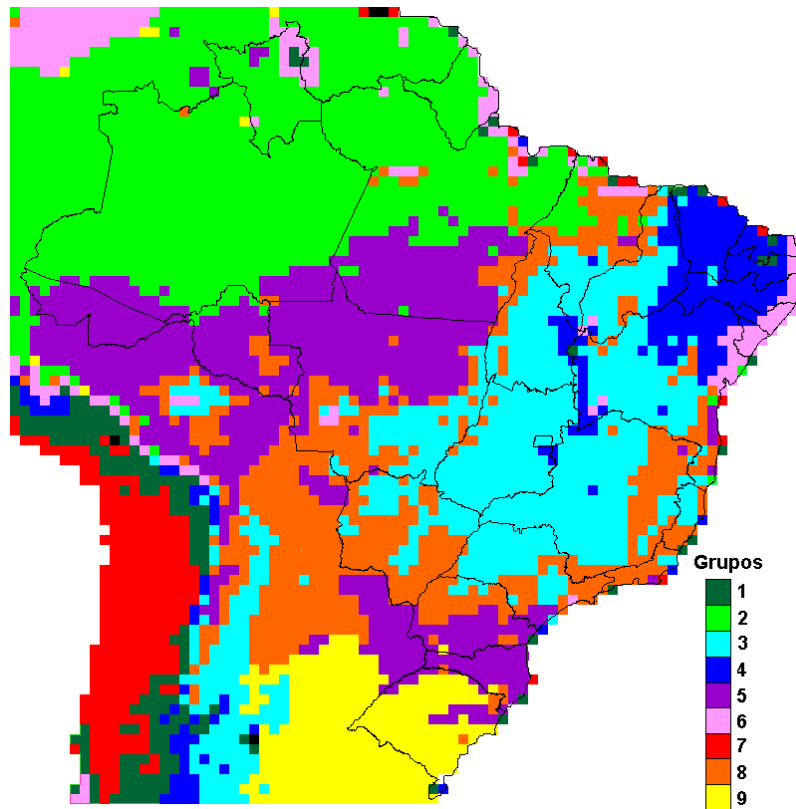


Fig. 4.12 – Resultado da análise de agrupamento realizada nos dados de NDVI.

a) Primeiro Grupo

Como a área de estudo engloba o entorno do Brasil, o primeiro grupo (verde escuro) encontrado pela análise de agrupamento foi à região dos Andes. Apesar de pequenas áreas do Brasil, que possuem baixos valores de NDVI ($\pm 0,30$), terem sido classificadas neste grupo (nordeste de Roraima, alguns pontos do litoral e da região da caatinga), ele não foi analisado, pois situa-se fora da área de estudo.

b) Segundo Grupo

O segundo grupo (verde claro) representa a região da floresta ombrófila densa (Figura 4.12), do norte do Brasil. Devido à pequena resolução espacial dos dados (64 km x 64 km), algumas áreas de floresta de transição no noroeste do Amazonas foram classificadas neste grupo. Como pode ser observado na Figura 4.13, este tipo de vegetação não apresenta um ciclo anual muito nítido. O máximo de NDVI desta formação vegetal, geralmente ocorre em junho, dois meses após o período de chuvas

que vai de fevereiro a abril. Almeida e Batista (1998), avaliando este tipo de formação vegetal também encontraram o mesmo tempo de resposta. Uma outra característica observada é a ocorrência de dois períodos de NDVI baixo; um entre fevereiro e março e outro entre setembro e novembro. O primeiro período, que aparentemente é mais marcante que o segundo, deve estar relacionado à contaminação de nuvens, que são muito frequentes nesta época do ano em praticamente toda a região Amazônica. Este efeito também foi encontrado por Batista et al. (1993), em análises de NDVI desta região. O segundo período está relacionado à época de diminuição das chuvas na região, que se estende de julho a outubro.

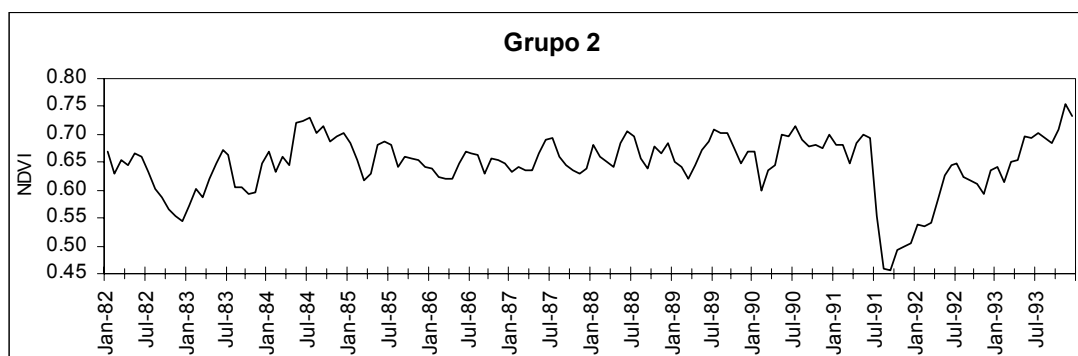


Fig. 4.13 - Média mês-ano do segundo grupo da análise de agrupamento de NDVI.

Na Figura 4.13 pode-se observar a ocorrência de duas quedas acentuadas no NDVI nos anos de 1982/83 e 1991/92, que são anos de El Niño. No segundo caso, a queda foi mais marcante que a primeira, porém o El Niño deste período foi menos intenso que o de 1982/83. Deve-se destacar que neste período houve a erupção do vulcão Pinatubo (Filipinas, Junho de 1991), o que também pode ter ocasionado uma diminuição do NDVI (Schultz e Halpert, 1995). Entre 1986/87, também ocorreu o El Niño, porém o NDVI não registrou uma queda significativa. Contudo, neste período os valores de NDVI durante a época chuvosa ficaram abaixo da média.

c) Terceiro Grupo

O terceiro grupo (azul claro) representa o cerrado (Figura 4.12), a formação vegetal encontrada na região central do Brasil. Este tipo de vegetação apresenta um ciclo

anual bastante nítido (Figura 4.14), possuindo valores máximos de NDVI entre março e maio, relacionados com o período das chuvas. Os valores mínimos são bem definidos e ocorrem no mês de setembro, final do período seco desta região. A grande variabilidade do NDVI no cerrado é decorrente da queda das folhas de grande parte dos indivíduos desta formação vegetal, durante o período de seca.

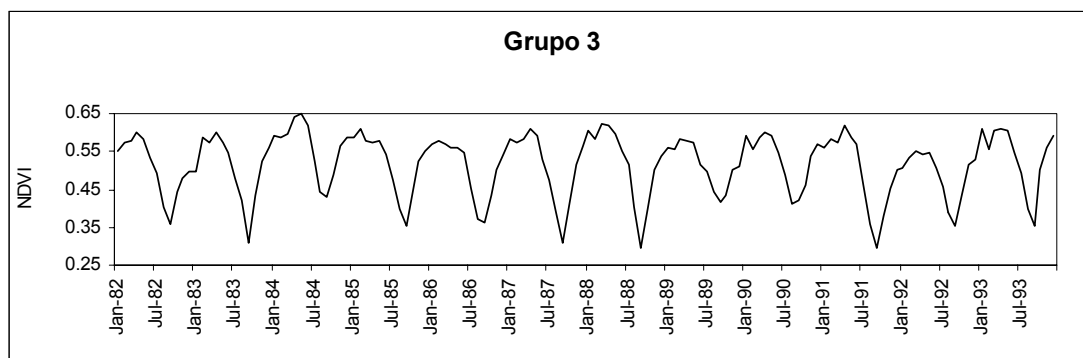


Fig. 4.14 - Média mês - ano do terceiro grupo da análise de agrupamento de NDVI.

Observa-se também que no período seco dos anos 1983, 87, 88 e 91 o NDVI apresentou uma queda acima da média (Figura 4.14). Nestes anos, com exceção de 1988, ocorreram eventos de El Niño que ocasionaram uma diminuição na precipitação na região central do Brasil, conforme mostra a componente três da ACP de ROL (Figura 4.6). Além disso, em 1988 ocorreu o maior número de focos de fogo já registrados em toda a região central do Brasil nesta região (Setzer, 1999). De acordo com Tanré et al. (1992), os aerossóis resultantes das queimadas, ocasionam uma redução nos valores do NDVI.

d) Quarto Grupo

O quarto grupo (azul escuro) da análise de agrupamento representa a caatinga, que está presente em grande parte da região nordeste do Brasil. Esta vegetação apresenta um ciclo anual bem definido, com um período seco marcante (Figura 4.15). Os valores mais altos de NDVI ocorrem entre os meses de abril e maio, que é o final da época das chuvas. Os meses de setembro e outubro apresentam os menores valores de NDVI. Este é o período mais seco desta região, sendo que em alguns locais o volume mensal de precipitação ficam próximo de zero milímetro nesta época.

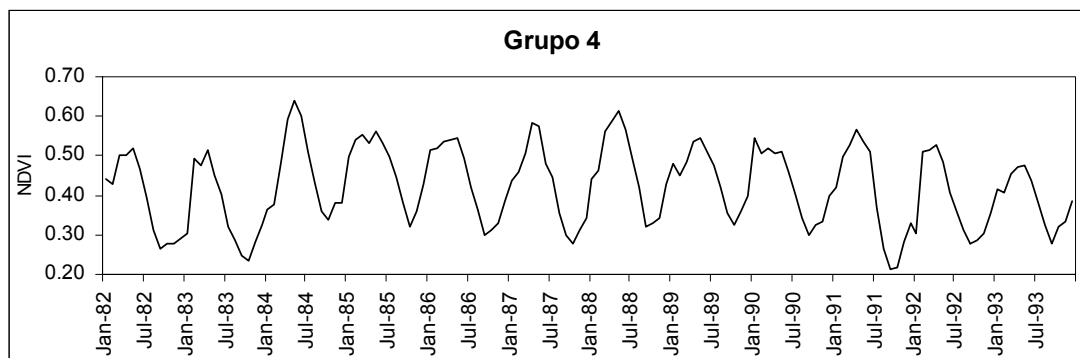


Fig. 4.15 - Média mês-ano do quarto grupo da análise de agrupamento de NDVI.

No período da ocorrência de El Niño em 1982/83 e 1991/93, os valores de NDVI ficaram abaixo da média, apresentando uma acentuada queda nos meses mais secos. Entretanto, esse decréscimo não foi tão acentuado como os que ocorreram na floresta ombrófila densa e no cerrado. Aparentemente isto ocorre porque normalmente grande parte dos indivíduos da caatinga perdem as folhas na época seca. Isto também explica a fraca anomalia observada na época seca durante o El Niño de 1986/87.

e) Quinto Grupo

Quinto grupo (roxo) representa dois tipos de vegetação, a floresta ombrófila aberta e a floresta ombrófila mista (Figura 4.12). O primeiro tipo de vegetação se localiza em toda borda sul da floresta ombrófila densa e o segundo abrange o estado de Santa Catarina e o sul do Paraná (ver Figura 2.3). Estes tipos de vegetação possivelmente foram classificados num único grupo, por apresentarem padrões florestais semelhantes com valores de NDVI bem próximos, e um ciclo anual comum.

As formações vegetais deste grupo apresentam um ciclo anual pouco nítido como pode ser observado na Figura 4.16. O mês de setembro, que é o final do período de seca, se destaca dos demais por apresentar os menores valores de NDVI. O período em que ocorrem os maiores valores de NDVI não são bem definidos, iniciando-se em novembro e estendendo-se até junho quando ocorrem os valores máximos. Isto talvez ocorra porque em novembro (início do período chuvoso) observa-se bastante nebulosidade na região devido à presença da ZCAS, ocasionando uma diminuição no NDVI. Já no outono a nebulosidade diminui (ver médias de ROL - Figura 4.1), elevando gradualmente o valor do NDVI.

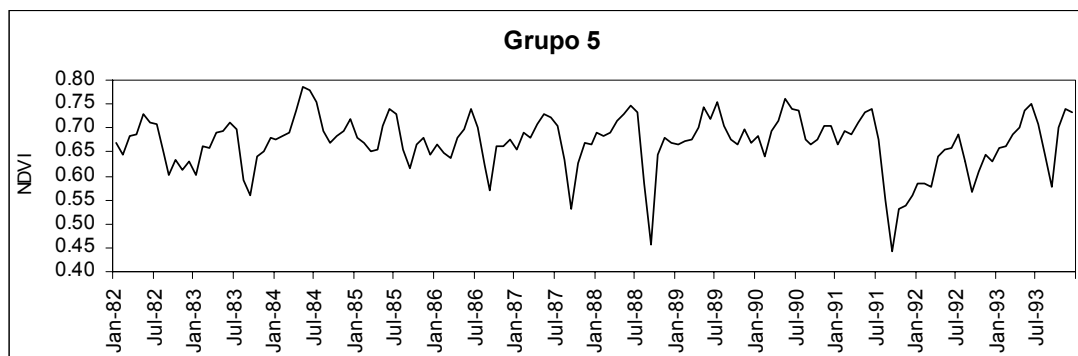


Fig. 4.16 - Média mês-ano do quinto grupo da análise de agrupamento de NDVI.

A variabilidade dos tipos de vegetação presentes neste grupo também apresenta oscilações em anos de El Niño (1982/83, 1986/87 e principalmente 1991/92). Porém, o El Niño de 1982/83, que foi o mais forte, não causou tanto impacto nestes tipos de vegetação como nos demais grupos.

Observa-se também, que setembro de 1988 é o mês que mais se destaca no período analisado. Este ano, que não está associado à ocorrência do El Niño, apresentou em toda a região central do Brasil, um dos maiores números de focos de fogo já registrados. Como mencionado anteriormente, os aerossóis resultantes das queimadas provocaram queda acentuada no NDVI.

f) Sexto Grupo

O sexto grupo (rosa) é o menor grupo reconhecido pela análise de agrupamento e representa a vegetação das regiões da zona da mata nordestina (litoral leste do nordeste) e dos campos de Roraima. A cobertura vegetal primitiva da primeira região, era de floresta ombrófila densa e aberta e de floresta estacional decidual. Atualmente esta região está bastante alterada, sendo a agricultura, principalmente da cana-de-açúcar, a principal cobertura vegetal.

As vegetações deste grupo apresentam um ciclo anual nítido (Figura 4.17). Observa-se que junho e julho, final da época chuvosa, ocorrem os maiores NDVI. Os menores valores ocorrem entre fevereiro e março, alguns meses antes do início das chuvas. Possivelmente, isto se dá devido à capacidade de retenção de água pelo solo

nesta região, pois a vegetação consegue atravessar o período seco (outubro a dezembro) sem que ocorra uma queda marcante no NDVI.

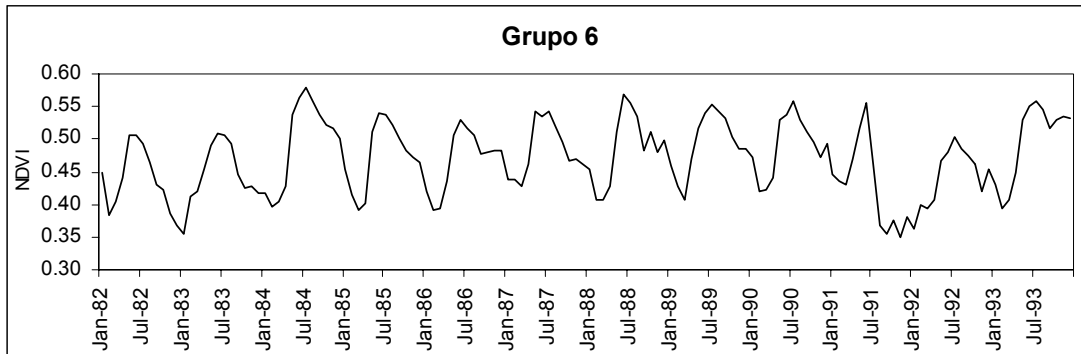


Fig. 4.17 - Média mês-ano do sexto grupo da análise de agrupamento de NDVI.

A análise desse grupo também revela que em 1982/83 o NDVI esteve abaixo da média e em 1991/92 os meses que deveriam ter valores altos de NDVI apresentaram valores muito baixos (Figura 4.17). Isto sugere que nestes períodos ocorreu precipitação abaixo do normal. Como consequência, os meses (maio a agosto) que deveriam ter valores altos de NDVI no ano seguinte, apresentaram valores abaixo da média. Observa-se também, que o El Niño de 1987, foi mais ameno que os de 1982/83 e de 1991/92. Neste ano o período de seca não foi tão afetado como nos demais anos de El Niño, apresentando inclusive NDVI um pouco acima da média, no período chuvoso os valores ficaram ligeiramente abaixo da média.

g) Sétimo Grupo

O sétimo grupo (vermelho), que representa a região da costa do oceano Pacífico, não foi analisado, pois não pertence às formações vegetais brasileiras. Ele foi classificado porque a área de estudo da análise de agrupamento, compreende áreas da América do Sul localizadas no entorno do Brasil.

h) Oitavo Grupo

O oitavo grupo (laranja), aparentemente não representa um grupo fitogeográfico definido; pode-se dizer que é uma área de transição no entorno do cerrado, conforme

observado na Figura 4.12. Provavelmente ele foi classificado devido a reamostragem dos dados que aumentou a área do pixel de 8 km para 64 km, o que ocasionou uma “área de confusão” no entorno do cerrado.

A vegetação representada neste grupo possui um ciclo anual nítido (Figura 4.18), o máximo de NDVI ocorre em maio, que é o final da época chuvosa na maior parte da região. O mínimo é bem marcante e ocorre em setembro, no final da época seca.

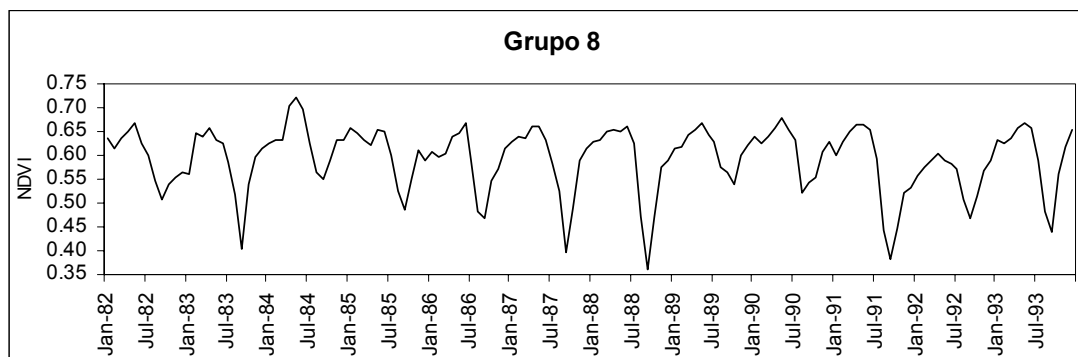


Fig. 4.18 - Média mês-ano do oitavo grupo da análise de agrupamento de NDVI.

Os anos de ocorrência do El Niño, 1983, 1987, e 1991/92, apresentaram um período seco bastante pronunciado principalmente em 1992, que teve valores de NDVI bem abaixo da média. Entretanto, foi no ano de 1988 que ocorreram os menores valores de NDVI na época da seca. Este ano como já foi relatado, foi o que apresentou o maior número de focos de incêndio, resultando em alta quantidade de fumaça (aerossol), o que possivelmente ocasionou esta queda (Tanré et al., 1992).

i) Nono Grupo

O nono grupo (amarelo) representa as campanhas gaúchas, a região de estepe do sul do Brasil. Este tipo de vegetação não apresenta um ciclo anual nítido (Figura 4.19), os valores máximos de NDVI geralmente ocorrem entre março e junho e os valores mínimos, melhores definidos, ocorrem no mês de agosto. Nessa região, o período das chuvas é muito variado, o que possivelmente influencia no padrão do ciclo anual. Entretanto, o noroeste do Rio Grande do Sul apresenta um regime de chuvas conforme

sugere a variabilidade do NDVI. Como a maior parte deste grupo se localiza nesta região, este deve ter tido um peso maior na caracterização do ciclo anual.

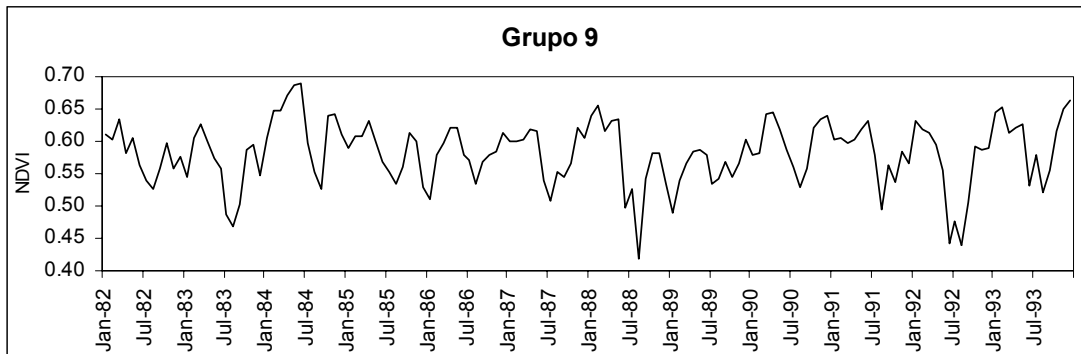


Fig. 4.19 - Média mês-ano do nono grupo da análise de agrupamento de NDVI.

Baixos valores de NDVI são observados, em 1982 e 1992 (anos de El Niño), porém isto não devem ter sido ocasionados por seca e sim por enchentes. Pois, a literatura demonstra que há ocorrência do aumento de chuvas para a região sul do Brasil durante o El Niño (Kousky e Cavalcanti, 1984 e CPTEC, 1998). Além de que logo após o período de queda do NDVI ocorrem valores acima da média, que devem estar relacionados com o aumento de disponibilidade de água no solo. No final de 1987 e início de 1988, também anos de El Niño, não teve queda no NDVI, apenas valores máximos de NDVI acima da média. Isto deve ter ocorrido porque este evento não foi tão intenso como os demais o que não ocasionou enchentes muito intensas. No final de 1988, ano de La Niña, caracterizado por pouca chuva no sul, houve uma forte queda no NDVI.

4.2.2 ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS DO NDVI

A Análise por Componentes Principais (ACP) padronizada realizada no conjunto de dados mensais de NDVI é baseada na interpretação das imagens componentes e dos gráficos de autovetores, como foi explicado no tópico 4.1.2. O realce aplicado nas imagens componentes de NDVI com exceção da primeira componente, foi o mesmo que o aplicado nas de ROL (tópico 4.1.2). O realce aplicado na primeira componente utilizou-se dos valores máximos e mínimos, pois todos os valores desta componente são positivos. Com exceção da primeira componente, as anomalias positivas aumentam gradualmente do verde ao vermelho e as anomalias negativas do azul ao preto. Quando

ocorre uma anomalia positiva há um aumento do nível de verde na superfície, e quando ocorre a negativa há uma diminuição do verde. Em todas as componentes as áreas de água foram mascaradas com a cor branca.

4.2.2.1 ANÁLISE DA PRIMEIRA COMPONENTE

A primeira componente resultante da ACP (Figura 4.20 e 4.21) mostra a distribuição da cobertura vegetal do Brasil. Ela contém 99,49% da variância total e representa o padrão médio dos meses analisados.

Comparando-se o mapa de vegetação do Brasil (Figura 2.3) e a primeira componente (Figura 4.20) observa-se uma grande semelhança entre ambos. Isto demonstra a potencialidade do NDVI em caracterizar, numa escala sinótica, as grandes feições de vegetação que predominam no território brasileiro.

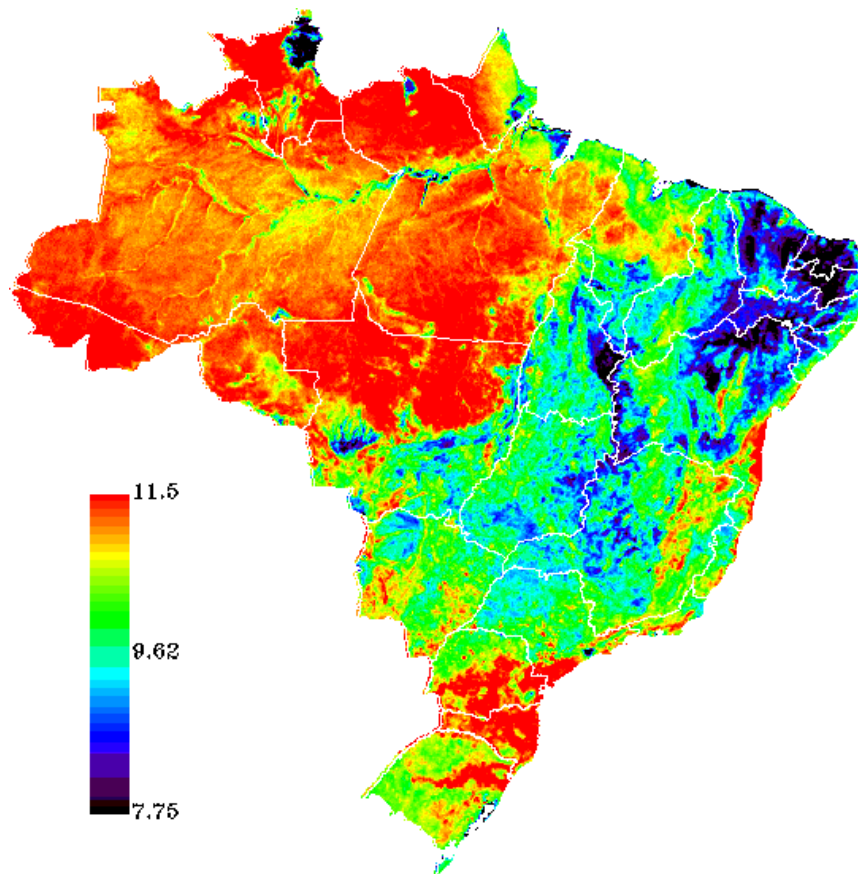


Fig. 4.20 - Primeira imagem componente da ACP de NDVI.

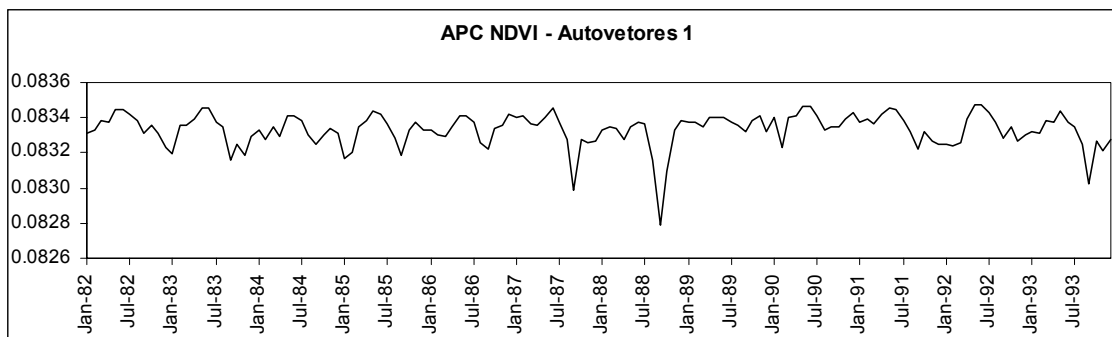


Fig. 4.21 - Autovetores da primeira componente de NDVI.

A escala de cores da imagem da primeira componente apresentada, varia do vermelho ao preto. O vermelho representa as regiões com os maiores valores de NDVI e corresponde aos locais com vegetação mais densa e verde durante todo o ano. O preto representa: regiões onde a vegetação fica apenas alguns meses verde durante o ano; regiões com pouca ou nenhuma vegetação; regiões de vegetação natural degradada pela ação do homem; ou ainda, regiões com água. A análise da Figura 4.20 revela as seguintes características:

- a) Na região norte do Brasil observa-se a presença da floresta ombrófila (Floresta Amazônica) (vermelho ao amarelo). Na calha principal do rio Amazonas há predominância da floresta ombrófila densa com valores de NDVI ligeiramente menores que das áreas de floresta ombrófila aberta. Essa característica também foi observada por Batista et al. (1993) e Almeida e Batista (1998). Aparentemente, isto ocorre devido à contaminação dos pixels por água, pois nesta região as várzeas são inundadas durante um período de 4 a 6 meses (Sippel et al., 1998), ou contaminação por nuvens que não foram eliminadas no processamento dos dados. Isto se justifica porque nas áreas densamente vegetadas e nas regiões úmidas, como é o caso desta região, observa-se alta cobertura de nuvens (Los et al., 1994 e Almeida, 1997). A nordeste de Roraima, na tonalidade variando do preto ao azul, destaca-se a região de savana (campos de Roraima). No litoral da região norte são visíveis os campos inundados, as florestas aluviais e os manguezais (verde ao azul), sendo bastante marcantes os da foz do Amazonas (sul da costa do Amapá e a Ilha de Marajó). Também é possível identificar as regiões desmatadas (amarelo ao verde) ao longo

dos eixos rodoviários na BR 163 no sul do Pará e a BR 364 e 316 em Roraima e sul do Amazonas.

- b) Na região nordeste, a vegetação dominante é a caatinga (tonalidade variando do azul ao preto), que é permeada por vegetações florestais semi-decíduais ou de transição (vermelho ao amarelo) presente nos chapadões, como na chapada da Diamantina, no centro da Bahia, e na chapada do Araripe, na divisa do Ceará com Pernambuco. No litoral sul da Bahia destaca-se a floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) (vermelho ao amarelo), apesar de já estar bastante alterada devido à ação antrópica.
- c) Na região sudeste destaca-se em seu litoral a Mata Atlântica (vermelho ao amarelo) nas serras do Mar e da Mantiqueira. O vale do Paraíba está caracterizado por uma vegetação mais rala (verde), resultante de um processo antrópico que ocorre há décadas pela ocupação humana na região do eixo Rio - São Paulo. A região da grande São Paulo (azul ao preto), que é a área mais densamente urbanizada do Brasil, está bastante visível. No leste de Minas Gerais, na serra do Espinhaço, observa-se a Zona da Mata Mineira (floresta estacional semidecidual) (vermelho ao amarelo) e no oeste de Minas Gerais predominam as formações de cerrado (azul). A cor azul no oeste de São Paulo, caracteriza a atividade agropecuária que predomina nesta região, já no centro e sudoeste de São Paulo a tonalidade verde destaca o domínio da intensa atividade agrícola da região.
- d) Na região centro oeste destaca-se a floresta de transição (vermelho), que é a faixa de contato entre a floresta ombrófila e os cerrados do Brasil central, no norte de Mato Grosso. Na divisa do Mato Grosso com Tocantins, no entorno do rio Araguaia, aparecem às áreas alagáveis (azul) onde ocorrem os campos de cerrados inundáveis. No sudoeste do Mato Grosso e noroeste do Mato Grosso do Sul é possível observar o complexo do Pantanal (verde ao azul). A vegetação predominante nesta região é o cerrado (verde ao azul), que domina todo o Tocantins e Goiás. Diversos pontos mais claros (vermelho ao amarelo) acompanham as regiões mais altas das chapadas, indicando a presença de formações vegetais mais densas e que permanecem verdes durante grande parte do ano. O sudeste do Mato Grosso do Sul apresenta uma

vegetação mais verde (vermelho ao amarelo) caracterizando as grandes áreas agrícolas.

- e) Na região sul tem-se a predominância da formação da floresta de araucária (floresta ombrófila mista) (vermelho). A noroeste do Paraná, observa-se uma região de domínio da floresta estacional semidecidual (verde), porém já bastante alterada pela ocupação agropecuária. No litoral do Paraná e de Santa Catarina observa-se a Mata Atlântica (vermelho). No noroeste do Rio Grande do Sul destaca-se a Campanha Gaúcha (estepe) (amarelo ao verde) e na região central deste estado observa-se uma vegetação mais densa e verde (vermelho) acompanhando o vale do rio Jacuí.

4.2.2.2 ANÁLISE DA SEGUNDA COMPONENTE

A segunda componente, que representa 0,12% da variância total, mostra o modo de verão/inverno do ciclo anual do NDVI. Os autovetores (Figura 4.23) desta componente apresentam os meses de inverno, com valores positivos e com máximos geralmente em setembro. Nos meses de verão, valores negativos, os mínimos ficam em torno de março. As regiões com anomalias positivas na Figura 4.22, indicam que o NDVI dessas regiões, nos meses de inverno e de verão, apresenta um padrão inverso das regiões com anomalias positivas. Ou seja, no inverno o NDVI das regiões com anomalias positivas fica acima da média e o das com anomalias negativas fica abaixo da média, no verão ocorre o oposto. A dicotomia entre estas duas regiões é bastante visível nas imagens médias de NDVI dos meses de março e setembro (Figura B.1)

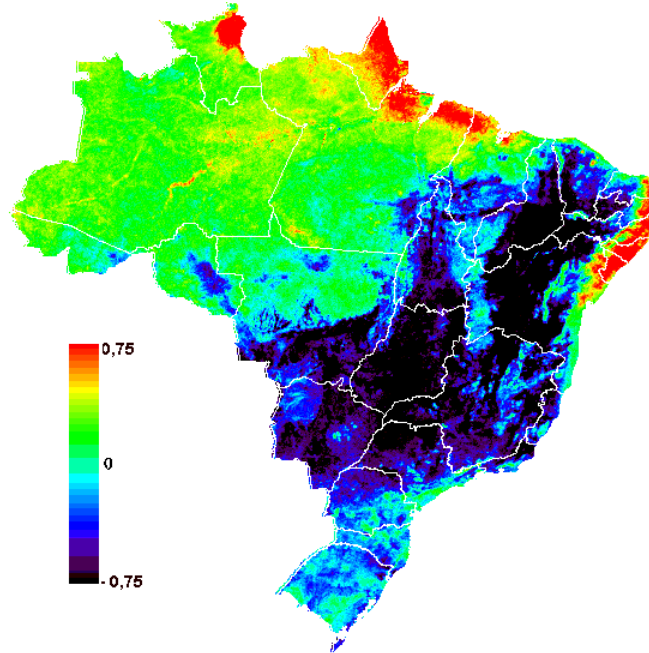


Fig. 4.22 - Segunda imagem componente da ACP de NDVI.

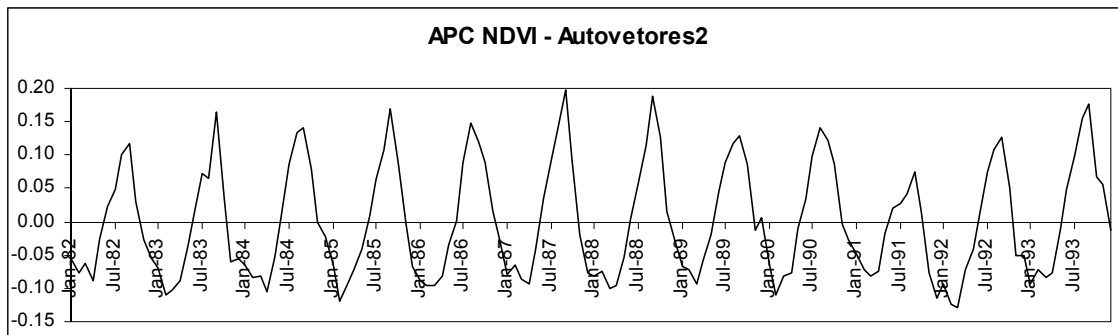


Fig. 4.23 - Autovetores da segunda componente de NDVI.

As regiões que apresentam fortes anomalias negativas, centro sul do nordeste e grande parte do centro oeste e sudeste, podem ter períodos de três a seis meses relativamente secos, e em alguns casos até dez meses. Os meses mais secos em quase toda esta área se estendem de junho a setembro, que é o período de queda do NDVI (Figura 4.23). O auge desta queda ocorre em setembro, final da época seca. As chuvas são predominantes no verão (dezembro a março), período em que a vegetação está mais verde. Isto indica que os tipos de vegetação (cerrado e caatinga) que cobrem esta região respondem quase que automaticamente ao aumento ou à diminuição das chuvas. Este

resultado também foi encontrado por Barbosa (1998), ao analisar esse tipo de formação vegetal.

Observa-se também que o norte da região norte, apresenta anomalias positivas de NDVI, indicando que a vegetação está mais verde entre agosto e setembro e mais seca entre fevereiro e abril. Como esta área situa-se ao norte do equador, as chuvas seguem o regime climático do Hemisfério Norte, ou seja, entre agosto e setembro ocorre o período chuvoso, e entre fevereiro e abril ocorre o período mais seco. Porém, do litoral do Amapá ao litoral norte do Maranhão, que também tem anomalias positivas, o máximo pluviométrico ocorre entre fevereiro e março. Nesta época os autovetores, ao contrário do esperado, mostram valores baixos de NDVI. Isto pode ser justificado por ser no verão o início do período das cheias dos rios que alagam grande parte desta região (Sippel et al., 1998). Além disso, nesta época ocorre um aumento da nebulosidade na região. Esse conjunto de fatores provoca diminuição no NDVI. A Ilha de Marajó é um bom exemplo, situada na foz do rio Amazonas, na época do verão fica quase que totalmente alagada. Situação semelhante ocorre no entorno do rio Amazonas e de seus principais afluentes.

O litoral leste do nordeste, que também apresenta anomalias positivas, possuía no passado uma cobertura vegetal de floresta ombrófila, mas atualmente está bastante alterada pela intensa atividade agrícola, sendo a cultura da cana-de-açúcar a predominante. Os autovetores desta componente, indicam que a atividade fotossintética da vegetação desta região é menor entre fevereiro e abril, e maior entre agosto e novembro. Porém, a análise de agrupamento e as imagens médias (Figura B.1) revelam que o período mais verde ocorre entre junho e julho, que é a época das chuvas. O regime de chuvas do litoral nordeste ocorre entre maio e julho e o de seca entre outubro e dezembro. Neste caso, apenas o período de NDVI mais baixo (fevereiro a abril) coincide com o encontrado na análise de agrupamento e nas imagens médias. Provavelmente, setembro aparece como o mês mais verde desta região, porque é neste mês que o cerrado apresenta os menores valores de NDVI e como o cerrado ocupa uma grande área do Brasil este mês tornou-se o de maior peso na determinação desta componente.

As áreas de floresta ombrófila (Floresta Amazônica, Mata Atlântica e Transição cerrado/floresta amazônica) tem anomalias positivas baixas, indicando que o ciclo anual nesta região não é bem definido. Além disso, não ocorrem variações bruscas no NDVI como nos demais tipos de vegetação, como também mostra a análise de agrupamento. Essas características também foram observadas por Eastman e Fulk (1993), para as florestas equatoriais da África.

Outro fato observado é que o ciclo anual, representado pelos autovetores, sofre algumas variações interanuais. A variabilidade de menor amplitude negativa ocorreu em 1991 e a de maior amplitude positiva em 1987, anos de ocorrência do fenômeno El Niño. Ao correlacionar os autovetores desta componente com a TSM do Niño 1+2 obteve-se $r = -0,79$ (significativo com $p < 0,05$ em todos os casos) que é um valor significativo. Entretanto, ao correlacionar os autovetores com o IOS encontrou-se uma correlação de apenas $r = -0,17$ com *lag* de um mês. Contudo, a correlação apresentada entre os autovetores da componente dois e o TSM do Niño 1+2, sugere que a vegetação responde às oscilações intranuais observadas, e nos casos de oscilações bruscas, como as associadas ao ENSO, o impacto na vegetação é bastante significativo.

4.2.2.3 ANÁLISE DA TERCEIRA COMPONENTE

A terceira componente representa o ciclo anual relativo a dicotomia primavera/outono (Figuras 4.24 e 4.25) e representa 0,07% da variância total. Os valores positivos dos autovetores representam a primavera, tendo o seu máximo geralmente em novembro. Os valores negativos representam o outono, com o mínimo ocorrendo frequentemente em maio.

Observa-se na imagem da terceira componente (Figura 4.24) uma faixa (tonalidade azul) que se estende do norte do nordeste ao centro da região norte. Nesta faixa, as chuvas são moduladas pela ZCIT, o que faz com que o período mais chuvoso se estenda de março a abril e o período com menor precipitação de agosto a outubro (Figuras 4.8 e 4.9). Entretanto, os autovetores revelam que o período em que a vegetação está mais verde situa-se entre abril e junho e o período em que a vegetação apresenta a menor atividade fotossintética ocorre entre outubro e dezembro. Isto demonstra que a

vegetação desta região leva cerca de um mês para responder a variação da precipitação. Barbosa (1998) também identificou este tempo de resposta para a vegetação da região nordeste do Brasil.

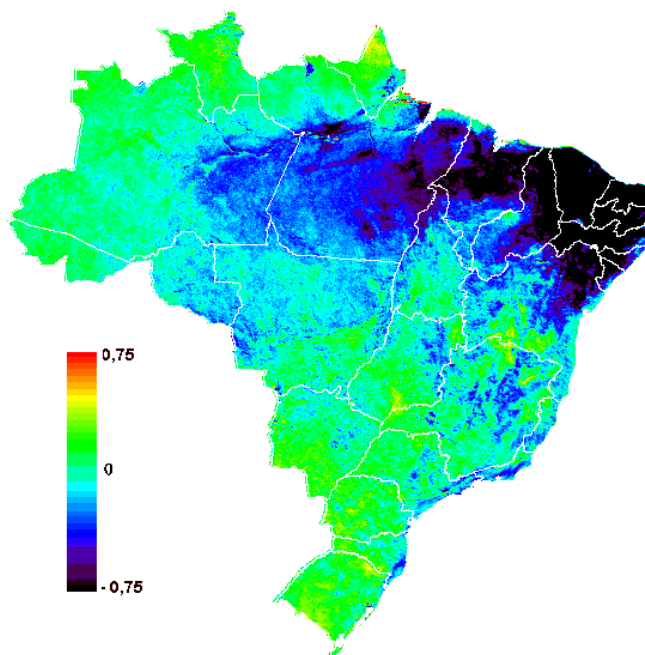


Fig. 4.24 - Terceira imagem componente da ACP de NDVI.

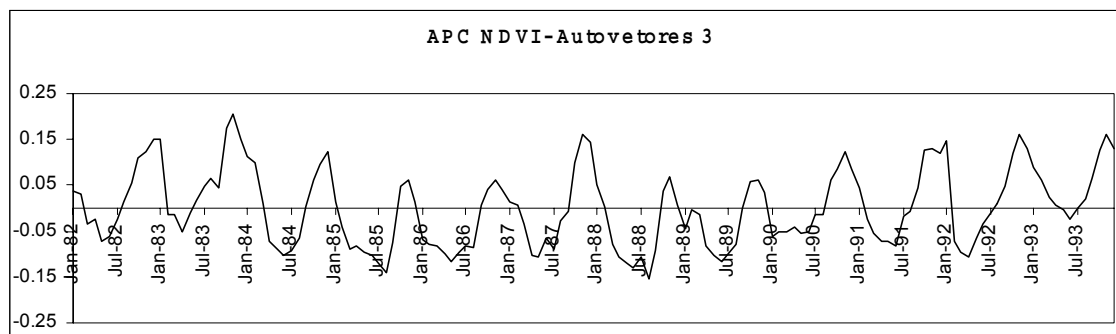


Fig. 4.25 - Autovetores da terceira componente de NDVI.

Ao contrário do que ocorre com a segunda componente, o ciclo anual da terceira componente não é muito regular, podendo-se observar oscilações interanuais significativas nos autovetores. As amplitudes máximas e mínimas ocorreram em 1983, 1987, 1992 e 1993 que foram anos de El Niño. O ano mais marcante na série temporal é 1983, que foi o ano de um dos mais fortes El Niño das últimas décadas (Trenberth,

1997). Ao observar a anomalia de ROL deste ano (Figura A.2), constatou-se que esta região sofreu uma forte anomalia positiva, indicando que as chuvas estiveram abaixo do normal. Os demais anos também apresentaram anomalias positivas, porém não tão marcantes quanto a que ocorreu em 1983. Estes resultados sugerem que o NDVI é sensível ao evento ENSO.

Ao correlacionar os autovetores da terceira componente, com um *lag* de dois meses, com a TSM do Niño 1+2 para o mesmo período, obteve-se um valor de correlação $r = 0,50$. Porém, ao correlacionar os autovetores com IOS, com dois meses de *lag*, obteve-se uma correlação $r = 0,30$. Resultados semelhantes foram encontrados na componente dois (tópico 4.2.2.2). Os valores de correlação encontrados indicam que há relação entre as variações de NDVI e o fenômeno El Niño.

4.2.2.4 ANÁLISE DA QUARTA COMPONENTE

A série temporal da quarta componente (Figura 4.27), mostra um ciclo semi-anual, com valores máximos em junho e outubro, e valores mínimos em janeiro e setembro. Esta componente representa 0,03% da variância total. Observa-se na Figura 4.26 que a região central do Brasil e uma estreita faixa do litoral de São Paulo a Santa Catarina apresentam anomalias positivas significativas. Estas anomalias provavelmente resultam da contaminação do NDVI por aerossóis de queimadas, pois as maiores anomalias negativas ocorrem em setembro, que é o mês de maior ocorrência de queimadas nestas regiões. Além disso, os anos em que se observou os menores valores negativos, 1987, 1988, 1991 e 1993, foram aqueles em que mais ocorreu esta prática de manejo e ocupação do solo. Deve-se destacar que o maior número de focos de fogo já registrados ocorreu em 1988 (Stezer, 1999).

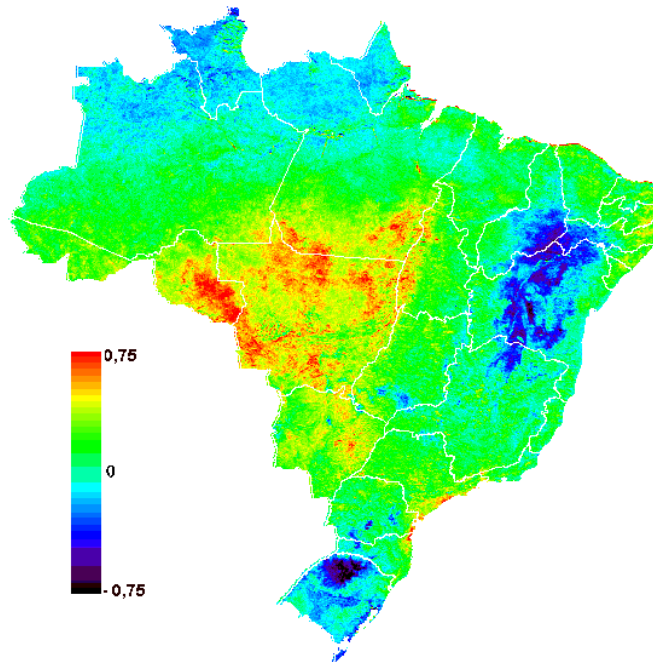


Fig. 4.26 - Quarta imagem componente da ACP de NDVI.

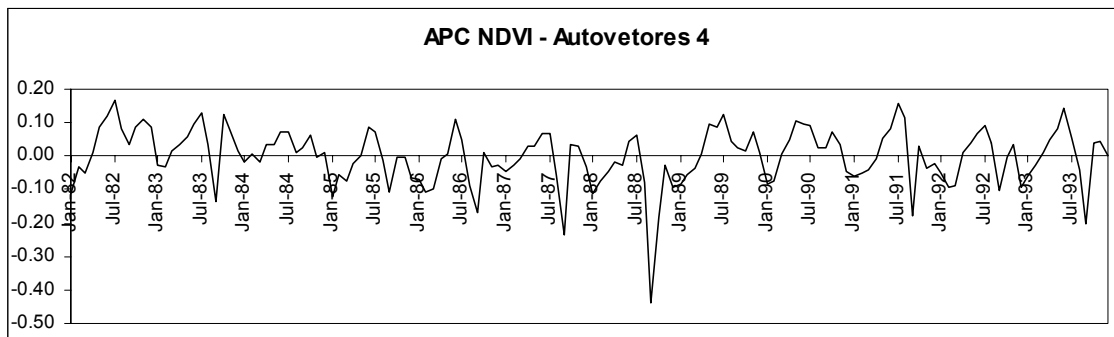


Fig. 4.27 - Autovetores da quarta componente de NDVI.

Outra característica observada na quarta componente é que as regiões central do nordeste e o norte do Rio Grande do Sul possuem altas anomalias negativas de NDVI. Ao estimar a média de NDVI a partir de amostras destas regiões (Figura 4.28), observa-se que na realidade a região central do nordeste não apresenta este comportamento. Ao contrário, ela apresenta valores altos de NDVI apenas entre janeiro e abril e valores baixos em setembro. Porém, o norte do Rio Grande do Sul apresenta dois picos anuais, como o encontrado nesta componente, com altos valores de NDVI em janeiro e setembro e baixos em junho e outubro. Eastman e Fulk (1993), em um estudo sobre NDVI do continente africano, obtiveram ciclo semelhante na quarta componente. Eles

associaram essa característica ao comportamento bi-modal da precipitação na região. Este tipo de comportamento climático é encontrado no norte do Rio Grande do Sul, por exemplo, em Santa Maria apresenta tanto chuvas de inverno como de verão (Silva, 2000).

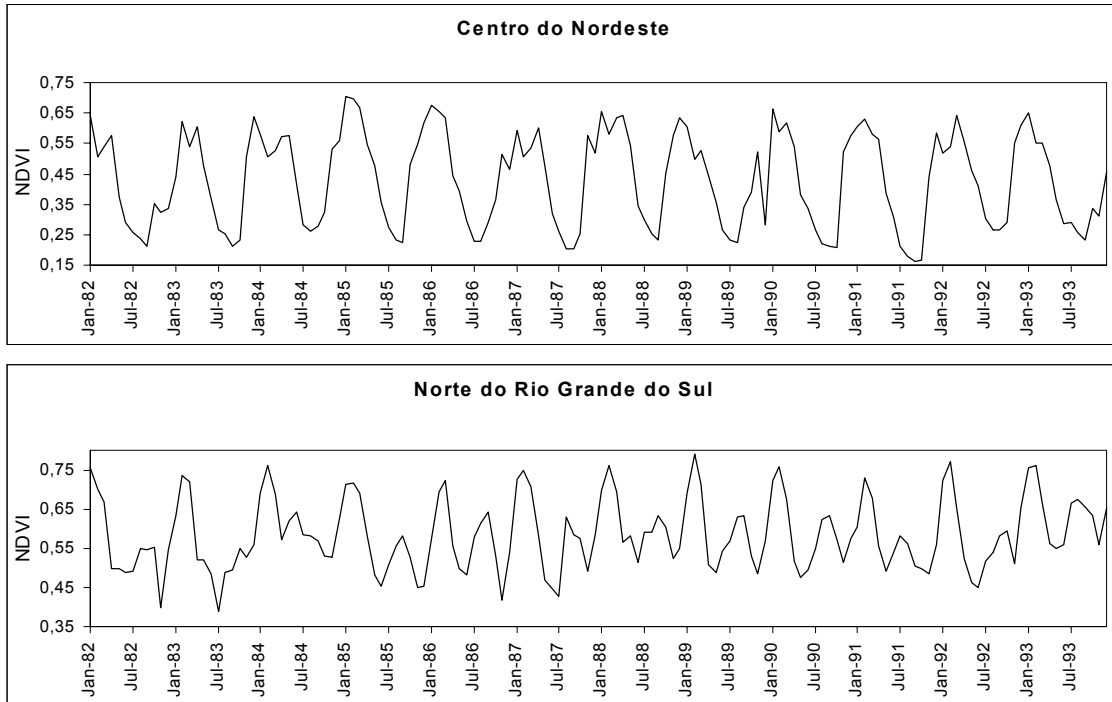


Fig. 4.28 – Média de NDVI da região central do nordeste e norte do Rio Grande do Sul.

4.2.2.5 ANÁLISE DA QUINTA E SEXTA COMPONENTES

Eastman e Fulk (1993), aplicando ACP em NDVI sobre o continente africano num período de 3 anos (1886-88), relacionaram as componentes cinco e seis à mudança de horário do cruzamento do equador do NOAA 9 e a degradação da calibração do satélite. Estas mudanças, de acordo com Gutman (1991), provocam variações no valor do NDVI que se tornam evidentes em estudos multitemporais. No presente estudo, as componentes cinco e seis (Figura 4.29), que representam 0,01% da variância total, apresentam os mesmos tipos de variações encontradas por Eastman e Fulk (1993). Na figura 4.30, pode-se observar que os autovetores da quinta componente aumentam lentamente até o início de 1985, posteriormente, ocorre uma leve queda seguida de aumento até o final de 1988, quando novamente ocorre uma diminuição seguida de

aumento. A componente seis mostra três tendências nos valores dos autovetores, a primeira com valores mais baixos entre 1982 e início de 1985, a segunda apresenta um leve aumento entre 1985 e final de 1988 e finalmente na terceira observa-se uma diminuição após 1989. Estes períodos de variação presente nos autovetores estão relacionados à utilização de dados de três plataformas NOAA distintas: NOAA 7 (agosto de 1981 a junho de 1986), NOAA 9 (fevereiro de 1985 a setembro de 1988) e NOAA 11 (novembro de 1988 a abril de 1995).

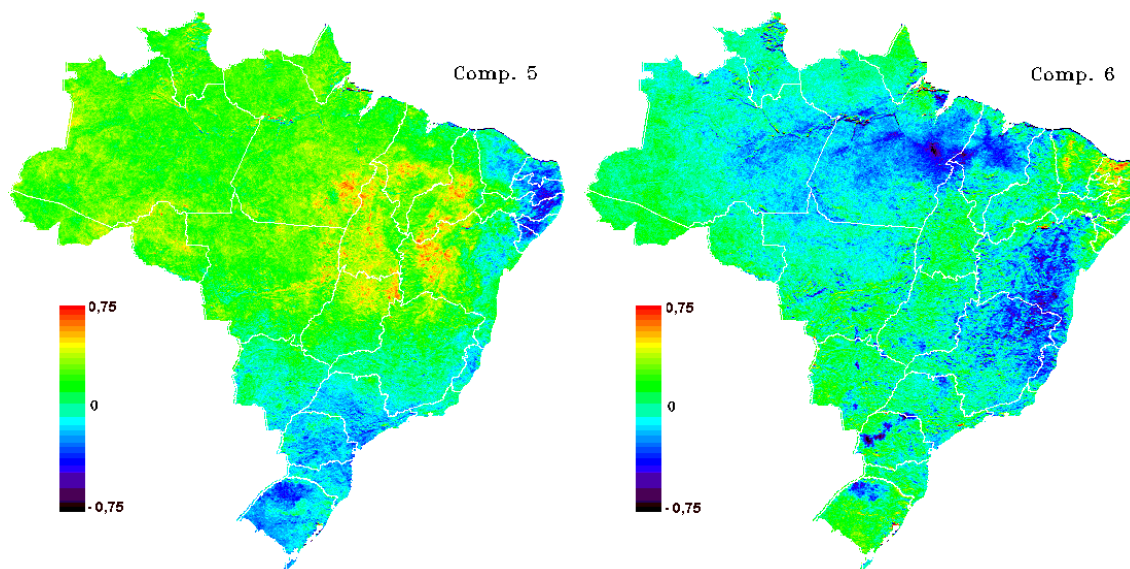


Fig. 4.29 - Quinta e sexta imagens componentes da ACP de NDVI.

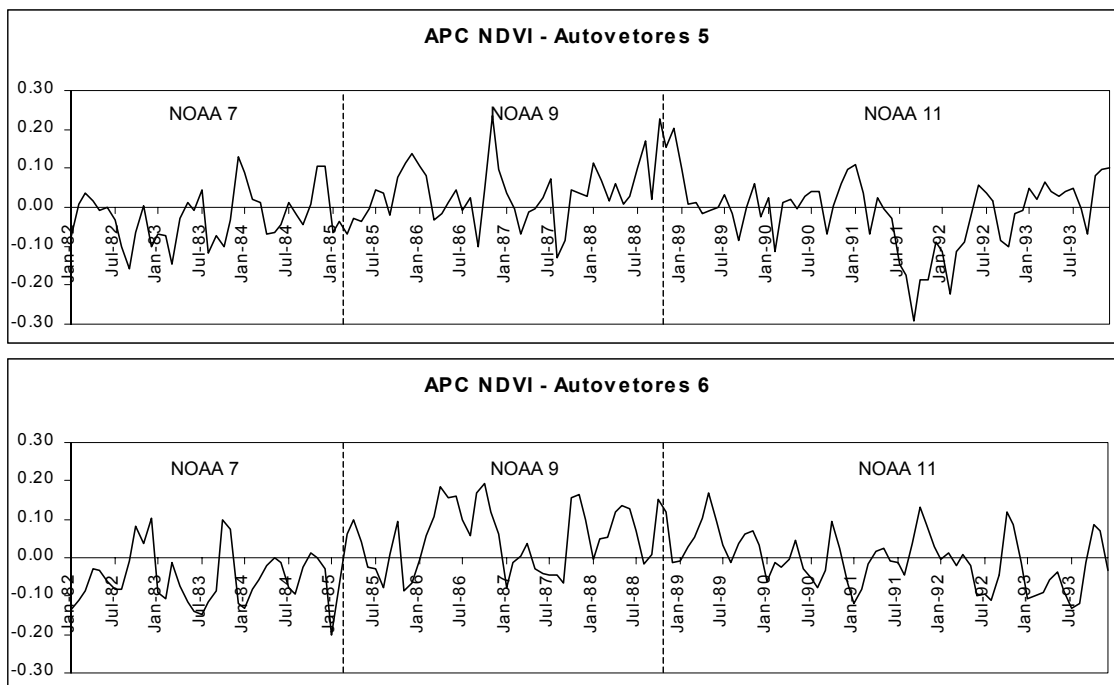


Fig. 4.30 - Autovetores da quinta e sexta componentes de NDVI.

Os ciclos das seis primeiras componentes representados pelos autovetores, descritos anteriormente, foram os mesmos encontrados por Townshend et al. (1985) e Eastman e Fulk (1993), na análise de séries temporais de NDVI para o continente africano. Eastman e Fulk conseguiram também interpretação para as componentes sete e oito, relacionando-as ao fenômeno El Niño. Entretanto, os autovetores das componentes sete e oito obtidos no presente trabalho não apresentaram nenhuma oscilação nítida, assim como o da componente nove.

4.2.2.6 ANÁLISE DA DÉCIMA COMPONENTE

Os autovetores da décima componente (Figura 4.32) apresentam uma característica interessante, ocorre uma mudança brusca nos valores de NDVI em 1988. Importante lembrar que em setembro daquele ano ocorreu a mudança do satélite NOAA 9 para o NOAA 11. Os dados do novo satélite começaram a ser efetivamente utilizados em novembro de 1988, que é o mês em que ocorreu a mudança nos autovetores. Esta mudança deve ter sido ocasionada pela a mudança do horário do cruzamento no equador destes satélites, que passou de $\pm 16:00h$ (NOAA 9) para $\pm 12:00h$ (NOAA 11), e/ou pela

a diferença de calibração dos sensores. Como já relatado anteriormente, estas mudanças provocam alterações nos valores de NDVI. Esta componente representa 0,01% da variância total.

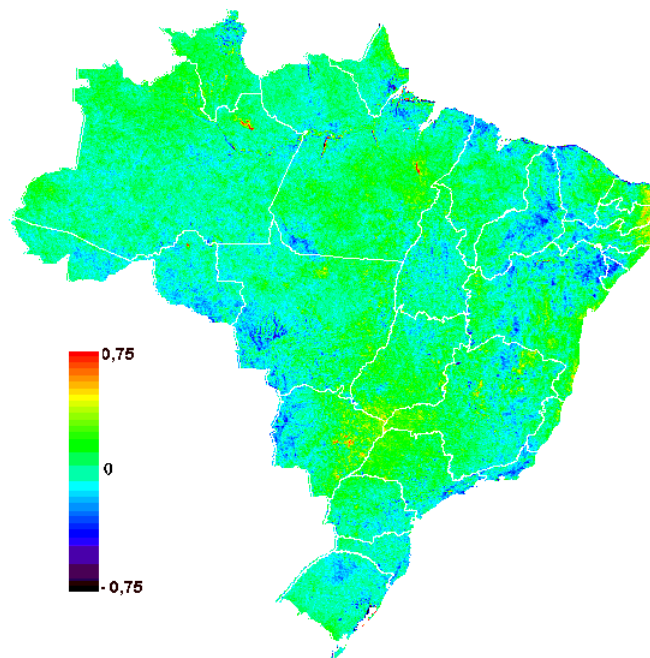


Fig. 4.31 - Décima imagem componente da ACP de NDVI.

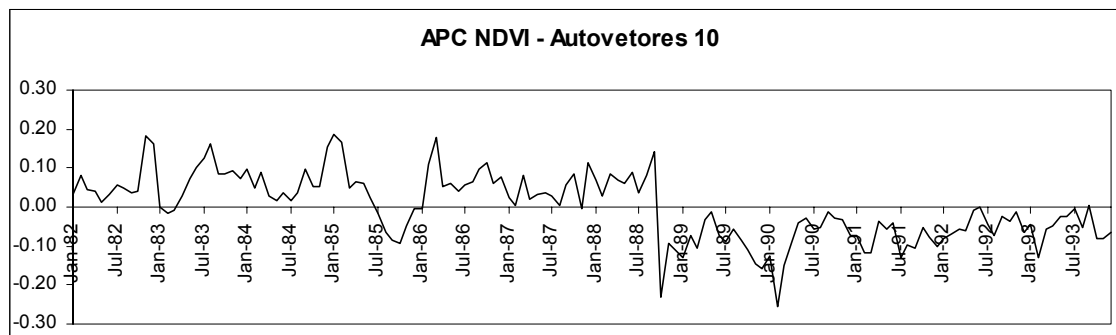


Fig. 4.32 - Autovetores da décima componente de NDVI.

As componentes 5, 6 e 10 mostram que apesar da intercalibração realizada no processamento do NDVI, nem todos os efeitos provocados pela mudança de plataforma e degradação no sensor são eliminados. A baixa variância dessas componentes mostra que esses efeitos não são tão significativos mas mostra que existem e devem ser levados em consideração.

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE NDVI E ROL

As correlações entre os autovetores de ROL e de NDVI, resultantes da ACP, foram calculadas para verificar estatisticamente a relação entre a variabilidade dessas variáveis. As análises de agrupamento e de componente principal realizadas nos dados de NDVI revelaram que alguns tipos de vegetação tem tempos de resposta diferentes em relação à precipitação. Desta forma, foram calculadas correlações com *lag* de 0 a 3 meses. A Figura 4.33 caracteriza bem este tempo de resposta.

A tabela 4.1 mostra o resultado da correlação entre os autovetores das componentes 2, 3 e 4 da ACP de NDVI e de ROL, com *lags* de 0, 1, 2 e 3 meses do NDVI em relação à ROL. As correlações foram calculadas apenas para as componentes 2, 3 e 4, pois estas foram a que apresentaram características climáticas bem definidas. Em todos os casos as correlações foram significativas com $p < 0,05$.

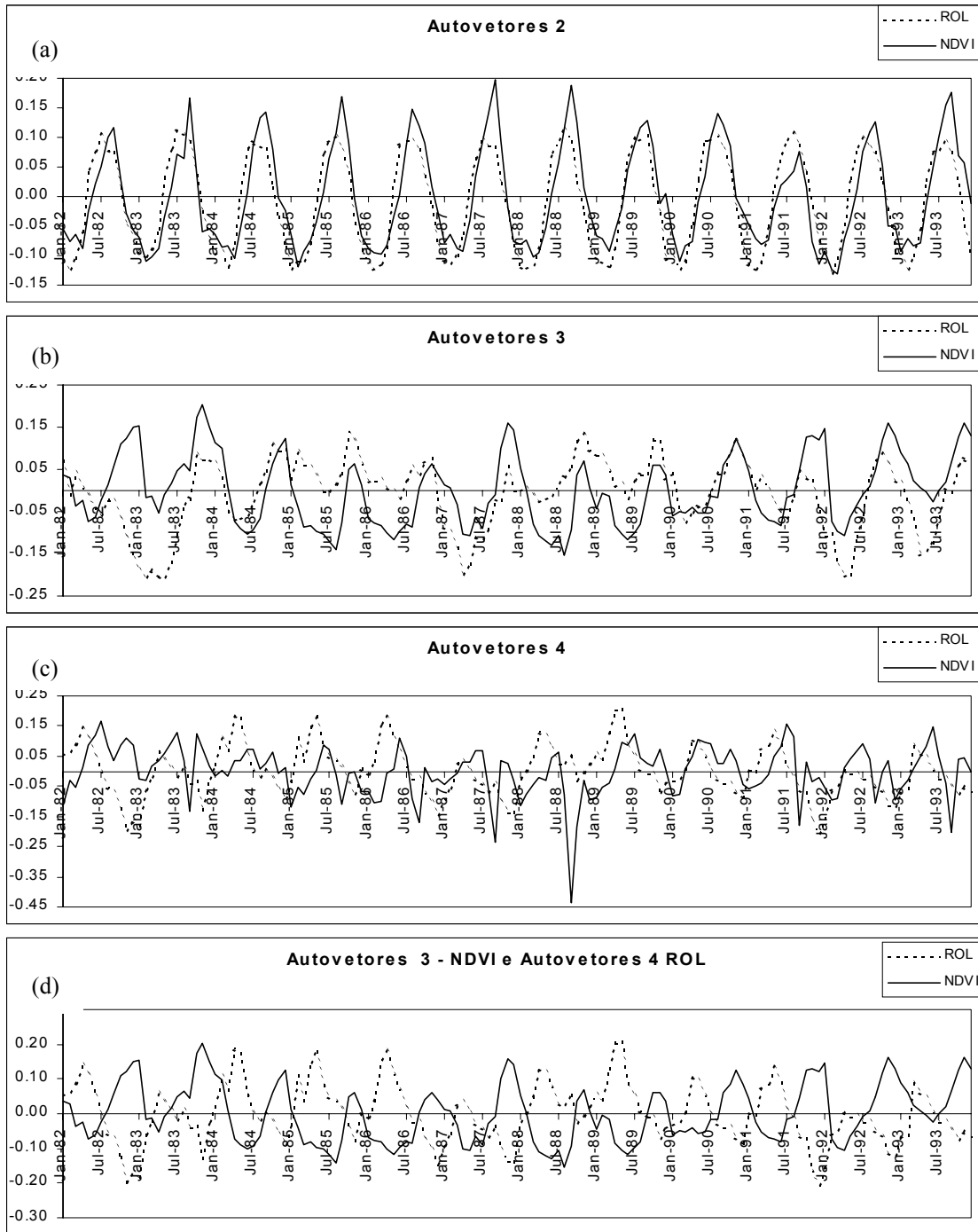


Fig. 4.33 - (a) Autovetores da segunda componente de NDVI e ROL, (b) autovetores da terceira componente de NDVI e ROL, (c) autovetores da quarta componente de NDVI e ROL e (d) autovetores da terceira componente de NDVI e da quarta de ROL.

TABELA 4.1 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR (r) DOS AUTOVETORES DAS COMPONENTES 2, 3 E 4 DA ACP DE NDVI E ROL

	<i>Lag 0</i>	<i>Lag 1</i>	<i>Lag 2</i>	<i>Lag 3</i>
Comp. 2 NDVI/Comp. 2 ROL	0,85	0,91	0,72	0,35
Comp. 3 NDVI/Comp. 3 ROL	0,27	0,26	0,13	-0,09
Comp. 4 NDVI/Comp. 4 ROL	0,07	0,28	0,38	0,24
Comp. 3 NDVI/Comp. 4 ROL	-0,70	-0,69	-0,51	-0,28

A alta correlação encontrada entre as segundas componentes do NDVI e ROL (Tabela 4.1), que representam o modo verão/inverno do ciclo anual, e a alta correlação encontrada entre a terceira componente de NDVI e a quarta componente de ROL que mostram o modo primavera/outono, indicam que a variabilidade anual da cobertura vegetal brasileira é modulada em grande parte pela variabilidade climática.

As baixas correlações encontradas entre as componentes três e quatro de NDVI e ROL são decorrentes dos distintos ciclos que cada uma dessas componentes representam. Pois, a terceira componente de NDVI representa o modo primavera/outono e a de ROL representa o ENSO, e a quarta componente de NDVI mostra o ciclo semi-anual; e a de ROL, o modo primavera/outono.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresenta uma análise estatística (componentes principais e agrupamentos) para avaliar as conexões entre a cobertura vegetal e o clima sobre o Brasil. As análises foram feitas utilizando-se imagens mensais de NDVI e ROL, derivadas do NOAA-AVHRR, para o período de janeiro de 1982 a dezembro de 1993.

Inicialmente foram analisadas as médias mensais de ROL, para caracterização das estações do ano e identificação dos principais sistemas de tempo que atuam na América do Sul. Posteriormente, utilizou-se a análise de componentes principais (ACP) para a obtenção dos padrões espaciais/temporais dos ciclos anual e interanual. Os resultados obtidos revelaram as seguintes características:

- a) a primeira componente está essencialmente associada ao padrão médio da atividade convectiva;
- b) a segunda e quarta componentes, estão associadas aos modos verão/inverno e primavera/outono do ciclo anual;
- c) o padrão temporal da terceira componente é modulado por eventos de El Niño durante o outono austral, e;
- d) a quinta componente está associada com o ciclo semi-anual.

A análise de agrupamento realizada nos dados de NDVI, revelou a variabilidade anual e interanual e o tempo de resposta à precipitação das grandes manchas de vegetação que ocorrem no Brasil. Os tipos de vegetação localizados em regiões com períodos secos e chuvosos marcantes, como é o caso do cerrado e da caatinga, apresentam ciclo anual bem caracterizado e respondem de forma rápida à ocorrência de chuva. Além disso, constatou-se que os eventos de ENSO, independente da sua intensidade, afetam distintamente os vários tipos de vegetação. O NDVI das vegetações mais densas e verde durante todo o ano, como é o caso da floresta Amazônica, são os que apresentaram

maior variabilidade quando ocorrem anomalias climáticas. Por outro lado, nas regiões onde o El Niño provoca uma diminuição da precipitação e que tem um período seco bem definido, como é o caso de grande parte do Nordeste, o NDVI apresenta pouca variabilidade durante o período seco e um ligeiro decréscimo no período chuvoso.

As imagens componentes e as séries temporais obtidas aplicando-se a ACP aos dados de NDVI, demonstraram a potencialidade desta variável em caracterizar, numa escala sinótica, as grandes feições da vegetação do território brasileiro. Os resultados dessa análise mostram que:

- a) a primeira componente está associada ao padrão médio do NDVI, destacando os principais tipos de vegetação que ocorrem no território brasileiro;
- b) a segunda e a terceira componente estão relacionadas aos padrões verão/inverno e primavera/outono do ciclo anual e ambas as componentes sofrem variações interanuais moduladas pelo evento ENSO;
- c) as demais componentes destacaram a ocorrência das queimadas (componente quatro), a mudança de horário da passagem dos satélites NOAA (componentes cinco e seis) e as trocas dos satélites NOAA 9 e 11 (componente dez).

Os altos valores de correlações obtidos entre os autovetores de ROL e NDVI, que correspondem aos modos de verão/inverno e primavera/outono do ciclo anual, indicam que a variabilidade anual da cobertura vegetal brasileira é modulada, em grande parte, pelo regime climático. Em síntese, verificou-se que as técnicas estatísticas utilizadas neste trabalho são ferramentas eficazes para caracterizar eventos de mudanças periódicas ou aperiódicas em dados de séries temporais obtidos por sensores remotos.

Devido ao potencial apresentado pela análise de agrupamento para classificar os grandes grupos de vegetação, recomenda-se aplicar esta técnica nos dados de NDVI especificamente para a área do Brasil, utilizando resolução plena (8 km x 8 km). Isto provavelmente possibilitará uma melhor separação dos diversos tipos de vegetação e conseqüentemente uma melhor compreensão da variabilidade climática associada.

Para um melhor aproveitamento da alta resolução temporal das imagens de NDVI obtidas pelo AVHRR, recomenda-se utilizar uma série temporal mais longa, abrangendo vários episódios de ENSO. Isto possibilitará uma melhor caracterização do impacto desse fenômeno nos diversos tipos de vegetação.

Recomenda-se também o uso de outras variáveis climáticas que eventualmente possam afetar o comportamento da cobertura vegetal, como por exemplo, umidade na baixa troposfera, temperatura, e medidas diretas de precipitação. Estas variáveis, possivelmente, permitirão uma melhor caracterização da relação entre a variabilidade climática e o NDVI. Além disso recomenda-se a utilização de ROL com uma resolução espacial mais refinada, o que possibilitará uma análise mais direta da relação do NDVI com a variabilidade climática.

Finalmente, para melhorar a compreensão da variabilidade espacial e temporal do NDVI, recomenda-se construir um sistema de informações geográficas para realizar a integração de dados como o próprio índice de vegetação, geomorfologia, uso do solo, cobertura vegetal, solos, hidrologia, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceituno, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1: surface climate. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 3, p. 505-524, Mar. 1988.
- Almeida, E. S. **Relação entre índice de vegetação derivado do NOAA-AVHRR e precipitação na região amazônica**. São José dos Campos. 90 p. (INPE-6390-TDI/606). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.
- Almeida, E. S.; Batista, G. T. Índice de vegetação versus precipitação na Amazônia. [CD-ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. **Anais**. São Paulo: Fábrica Multimídia, 1998. Seção de Trabalhos Orais.
- Andreoli, R. V. **Variabilidade interanual de campos atmosféricos totais e zonalmente assimétricos**. São José dos Campos. 95 p. (INPE-6776-TDI/637). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Anyamba, A.; Eastman, J. R. Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño/Southern Oscillation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 13, p. 2533-2548, Set. 1996.
- Barbosa, H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região nordeste do Brasil em 1982-85**. São José dos Campos. 164 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E.; Lawrence, W. T. Monitoramento da cobertura florestal através de índice de vegetação do NOAA-AVHRR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1993. v. 2, p. 30-37.

- Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E.; Lawrence, W. T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 15, p. 3195-3210, Oct. 1997.
- Cavalcanti, I. F. A. Episódios El Niño / Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. [on line]. **Climanálise**. n. especial, out. 1996. <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/nino.html>>. Dec. 1999.
- Centro Integrado de Meteorologia e Recursos Hídricos de Santa Catarina (CLIMERH). **Fenômeno El Niño**. [on line] < <http://www.climerh.ret-sc.br/nino/index.html> > Abr. 1999.
- Doty, B.E. **Using Grid Analysis and Display System**. Maryland: Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions - University of Maryland, Jul. 1992.
- Eastman, J. R.; Fulk, M. Long sequence time series evaluation using standardized principal components. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 8, p. 1307-1312, Aug. 1993.
- Ehrlich, D.; Lambin, E. F. Broad scale land-cover classification and interannual climatic variability. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 5, p. 845-862, Mar. 1996.
- Eklundh, L.; Singh, A. A comparative analysis of standardized and unstandardized Principal Components Analysis in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p. 1359-1370, May. 1993.
- Environment for Visualizing Images (ENVI). **ENVI Online Guide**. [on line] < <http://www.rsinc.com> > Jun. 1999.
- Ferreira, N. S. Zona de convergência intertropical. [on line]. **Climanálise**. n. especial, Out. 1996. <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/zcit_1.html>. Dec. 1999.

- Figuerola, S. N. **Estudos dos Sistemas de Circulação de verão sobre a América do Sul e suas simulações com modelos numéricos**. São José dos Campos. 181 p. (INPE-7121-TDI/672). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.
- Fung, T., LeDrew, E. Application of Principal Components analysis to change detection. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53, n.12, p. 1649-1658, Dec. 1987.
- Gallaudet, T. C.; Simpson, J. J. Automated cloud screening of AVHRR imagery using split and merge clustering. **International Journal of Remote Sensing**, v. 3, n. 2, p. 77-121, Nov. 1991.
- Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC). **Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Land FTP Data**. [on line] <http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/FTP_SITE/readmes/pal.html> Jan. 1999.
- Goward, S. N.; Tucker, C. J.; Dye, D. G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. **Vegetatio**, v. 64, n.1, p. 3-14, Dec. 1985.
- Gruber, A.; Krueger, A. F. The status of the NOAA outgoing longwave radiation data set. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 65, n. 9, p. 958-962, Sep. 1984.
- Gutman, G. G. Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. **Remote Sensing of Environmental**, v. 35, n. 3-2, p. 121-136, Feb.-Mar. 1991.
- Guyot, G.; Guyon, D.; Riou, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v. 4, n. 3, p. 3-18, Sep. 1989.
- Haan, C. T. **Statistical methods in hydrology**. Ames: Iowa State University Press, 1977. 378 p.

- Heddinghaus, T. R.; Krueger, A. F. Annual and interannual variations in outgoing longwave radiation over the tropics. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 6, p. 1208-1218, Jun. 1981.
- Hellden, U.; Eklundh, L. National drought impact monitoring: a NOAA NDVI and precipitation data study of Ethiopia. **Lund Studies in Geography: Serie C. General Mathematical and Regional Geography**. Lund: Lund University Press, 1988. n. 15, 55 p.
- Holben, B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1417-1434, Nov. 1986.
- Horel, J. D.; Hadmann, A. N.; Geisler, J. E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. **Journal Climate**, v. 2, n. 11, p. 1388-1403, Nov. 1989.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) **Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1993, 154p.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**.
<<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/material.html>> Jun. 1999.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE. CPTEC). **Conseqüências do fenômeno El Niño sobre o território brasileiro e perspectivas para 1998**. [on line]
<<http://www.cptec.inpe.br/products/elniño>> Jan. 1998.
- International Geosphere-Biosphere Program (IGBP). **International Geosphere-Biosphere Program Report: the initial core projects**. Stockholm: IGBP, 1990. n. 12., 330 p.

- Janowiak, J. E.; Krueger, A. F.; Arking, P. A. **Atlas of outgoing longwave radiation derived from NOAA satellite data.** Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Md., 1985. 44 p. (NOAA Atlas 6).
- Judez Asensio, L. **Técnicas de análisis de datos multidimensionales:** bases teóricas y aplicaciones en agricultura. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 1988. 301p.
- Justice, C. O.; ECK, T. F.; Tanré, D.; Holben, B. N. The effect of water vapour on the normalized difference vegetation index derived for Sahelian region from NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1165-1187, Jun. 1991.
- 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**, v. 77, n. 3, p. 437-471, Mar. 1996.
- Kaufman, Y. J.; Holben, B. N. Calibration of the visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 21-52, Jan. 1993.
- Kayano, M. T.; Kousky, V. E.; Janowiak, J. E. Outgoing longwave radiation biases and their impacts on empirical orthogonal function modes of interannual variability in the tropics. **Journal of Geophysical Research**, v.100, n. D2, p. 3173-3180, Feb. 1995.
- Kidwell, K. B. **Noaa Polar Orbiter Data User's Guide**, November 1998. [on line] <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/index.htm>> Dec. 1999.

- King, M. D.; Kaufman, Y. J.; Menzel, W. P.; Tanré, D. Remote sensing of cloud, aerosol and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 1, p. 2-27, Jan. 1992.
- Kodama, Y-M. Large-scale common features of subtropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 71, n. 7, p. 581-610, Oct. 1993.
- Kousky, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, Sep. 1979.
- Kousky, V. E.; Cavalcanti, I. F. A. Eventos Oscilação - El Niño: Características, evolução e anomalias de precipitação. **Ciência e Cultura**, v. 36 n.11 p. 1888-1899, Nov. 1984.
- Kousky, V. E.; Kayano, M. T. Principal modes of outgoing longwave radiation and 250 mb circulation for the South American sector. **Journal of Climate**, v.7, n.7, p. 1131-1143, July. 1994.
- 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 Environment, 24. Rio de Janeiro, 1991. **Proceedings**. v.2 p. 725-732.
- Lockwood, J. G. **World climatic systems**. London: Edward Arnold, 1985. 292 p.
- Los, S. O.; Justice, C. O.; Tucker, C. J. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies derived from GIMMS continental NDVI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 17, p. 3493-3518, Nov. 1994.

- Malingreau, J. P.; Tucker, C. J.; Laporte, N. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 4-5, p.855-867, Apr.-May. 1989.
- Manso, A. F.; Illera, P.; Delgado, J. A.; Unzueta, A. F. Climatic interpretation of the NDVI: applications for vegetation monitoring in Castilla y León (Spain). In: EUROPTO Conference on Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology, Barcelona, 1998. **Proceedings**. v. 3499, p. 372-383.
- Myneni, R.B.; Tucker, C.J.; Asrar, G.; Keeling, C.D. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 103, n. D6, p. 6145-6160, Mar. 1998.
- National Research Council (NRC). **Toward an understanding of global change: initial priorities for US contributions to the international Geosphere-Biosphere Program**. Washington DC: National Academy Press, 1988.
- Ohring, G.; Gruber, A.; Ellingson, R. Satellite determination of the relationship between total longwave radiation flux and infrared window radiance. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.23, n. 3, p.416-425, Mar. 1984.
- 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.
- Prince, S.D.; Goward, S.N. Global primary production: a remote sensing approach. **Journal of Biogeography**, v.22, n.4-5, p.815-835, July-Sep. 1995
- Quadro, M. F. L. **Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. São José dos Campos. 124 p. (INPE-6341-TDI/593). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.

- Rao, V. B.; Hada, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, n. 2, p. 81-91, 1990.
- Rasmusson, E. M. Observational aspects of ENSO cycle teleconnections. In: Glantz, M.; Katz, R. W.; Nicholls N. eds. **Teleconnections linking worldwide climate anomalies: scientific basis and societal impacts**. London: Cambridge University Press, 1991. p. 309-343.
- Rasmusson, E. M.; Arkin, P. Interannual climate variability associated with the El Niño/Southern Oscillation. In: Nihoul J. C. J. ed. **Coupled-Ocean Atmosphere Models**. Amsterdam: Elsevier, 1985. p. 697-725.
- Richard, Y.; Pocard, I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 15, p. 2907-2920, Oct. 1998.
- Richards, J. A. **Remote Sensing Digital Images Analysis: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 281p.
- Richman, M. B. Rotation of principal components. **Journal of Climatology**, v.6, n. 3, p. 293-335, May.-June 1986.
- Rocha, A. M. G. C; Gandu, A. W. A zona de convergência do atlântico sul. [on line]. **Climanálise**. n. especial, Out. 1996.
<<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/16.html>>. Dec. 1999.
- Ropelewski, C. H.; Halpert, S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1606-1626, Aug. 1987.
- Ropelewski, C. H.; Halpert, S. Precipitation patterns associated with the high index phase of Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, n. 2, p. 268-284, Feb. 1989.

- Rouse, J. W.; Hass, R. H.; Deering, D. W.; Schell, J. A. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation.** Austin: Texas A. M. University, College Station, 1974.
- Roy, D. P.; Kennedy, P.; Folving, S. Combination of the Normalized Difference Vegetation Index and surface temperature for regional scale European Forest cover mapping using AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 5, p. 1189-1195, Mar. 1997.
- Sansigolo, C. A. **Análise por Principais Componentes.** (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José Campos, 1999). Comunicação pessoal.
- Santos, G.; Novo, E. M. L. M. **Uso de dados do Landsat-1 na implementação, controle e acompanhamento de projetos agropecuários no sudoeste da Amazônia legal.** São José dos Campos: INPE, 1977. 207 p. (INPE-1044-TPT/56).
- SAS, Institute. **SAS procedures guide**, release 6, edition3. Cary: NC, 1988. 441p.
- Schultz, P. A.; Halpert, M. S. Global Analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 15, p.2755-2777, Oct. 1995.
- Setzer, W. A. **Queimadas no Brasil.** (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José Campos, 1999). Comunicação pessoal.
- Setzer, W. A.; Pereira, M. C.; Pereira A. C. O uso de satélites NOAA na detecção de queimadas no Brasil. **Climanálise**, v. 7, n. 8, p. 41-53, Ago. 1992.
- Silva, P. D. **Regime de Chuvas Rio Grande do Sul.** (Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000). Comunicação pessoal.
- Sippel, S. J.; Hamilton, S. K.; Melack, J. M.; Novo, E. M. M. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 16, p. 3055-3074, Nov. 1998.

- Smith, R. C. G.; Choudhury, B. J. On the correlation of indices of vegetation and surface temperature over south-eastern Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 11, p. 2113-2110, Nov. 1990.
- Swain, P. H.; Davis, S. M. ed. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, 1978. 396 p.
- Tanré, D.; Holben, B. N.; Kaufman, Y. J. Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: theory and application. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 231-248, Feb. 1992.
- Townshend, J. R. G.; Goff, T. E.; Tucker, C. J. Multitemporal and dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-23, n.6, p. 888-895, Nov. 1985.
- Townshend, J. R. G.; Justice, C. O.; Kalb, V. Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p.1189-1207, Aug. 1987.
- Townshend, J. R. G.; Tucker, C. J.; Goward, S. N. Global vegetation mapping. In: Gurney R. J. Foster, J. L.; Parkinson, C. L. ed. **Atlas of satellite observations related to global change**. 1.ed. London: Cambridge University Press, 1993. Cap. 6, p. 301-311.
- Trenberth, K. E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p.2771-2777, Dec. 1997.
- Tucker C. J.; Townshend, J. R. G.; Keeling, C.D.; Gammon, R. H. Relation between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index. **Nature**, v. 319 n. 6050, p.195-199, Jan. 1986.
- Tucker, C. J.; Sellers, P. J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p.1395-1416, Nov. 1986.

- Uvo, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro.** São José dos Campos. 99p. (INPE-4887-TDI/378). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.
- Virji, H. A preliminary-study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 3, p. 599-610, Mar. 1981.
- Waliser, D. E.; Zhou, W. F. Removing satellite equatorial crossing time biases from the OLR and HRC databases. **Journal of Climate**, v. 10, n. 9, p.2125-2146, Sep. 1997.
- Wilks, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction.** California: Academic, 1995. 467 p.

APÊNDICE A

MÉDIA MENSAL E ANOMALIA ANUAL DE ROL

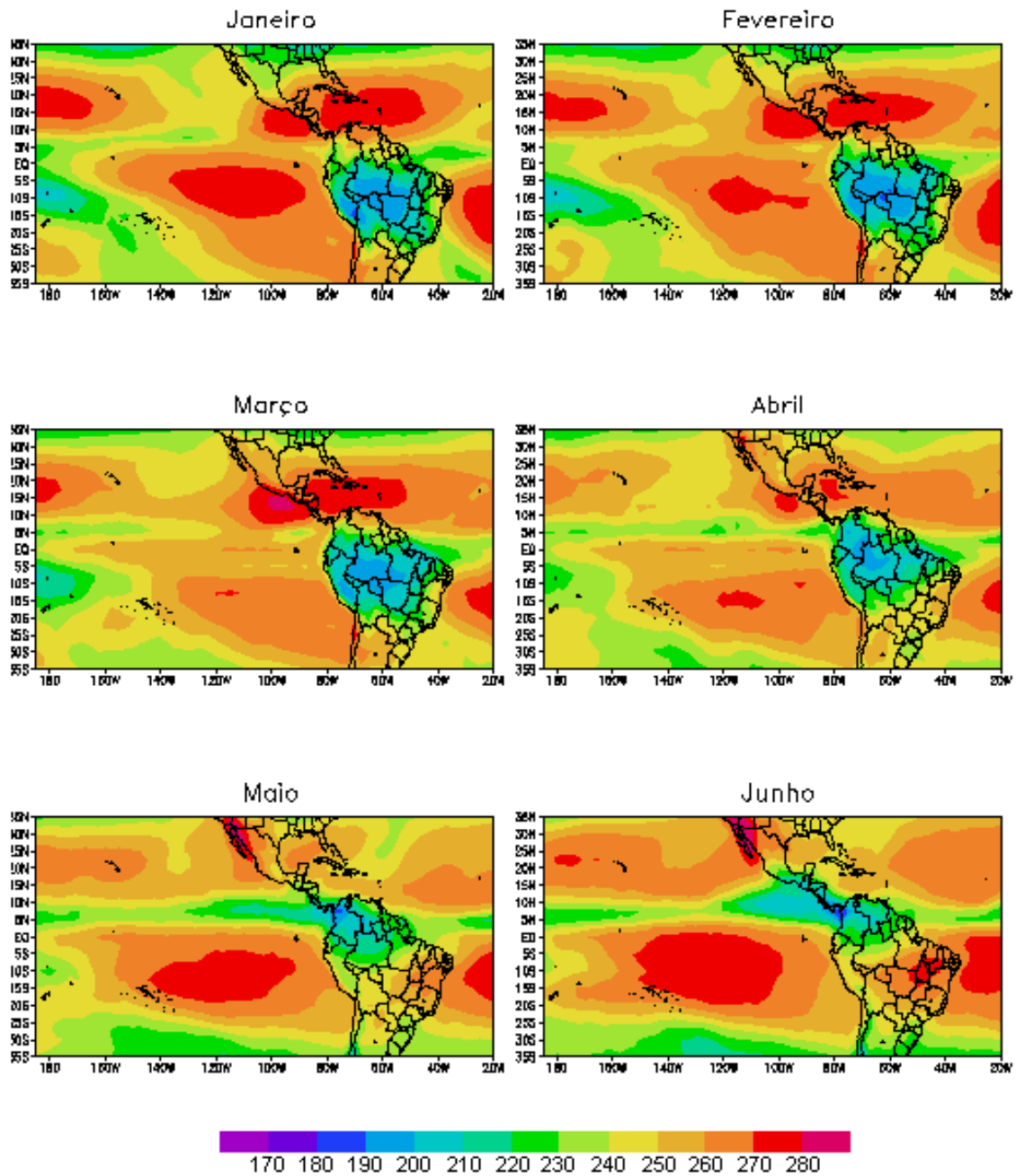


Fig. A.1 – Média mensal de ROL, em Watts/m², de 1982 a 1993 (continua).

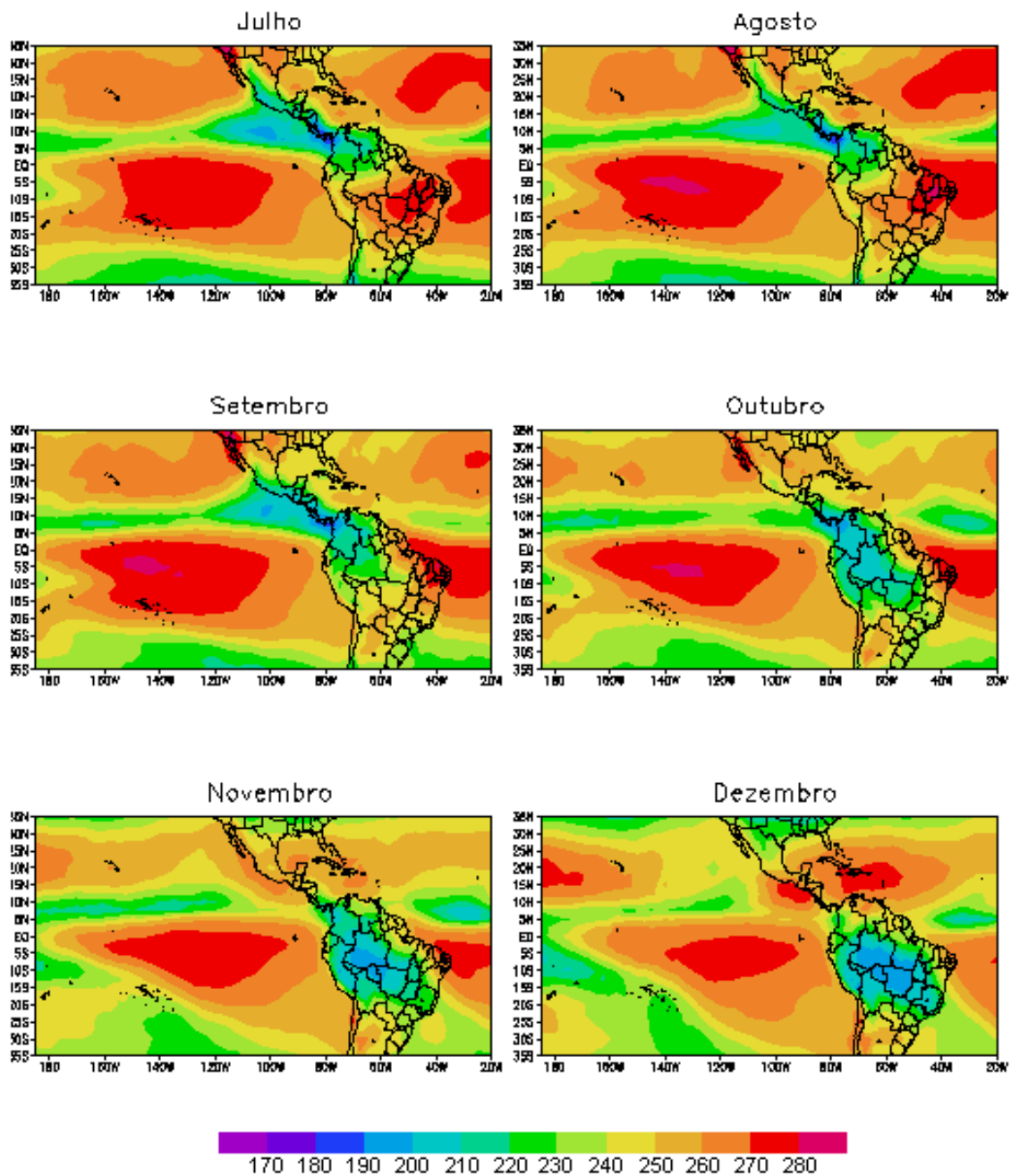


Fig. A.1 – Média mensal de ROL, Watts/m², de 1982 a 1993 (conclusão).

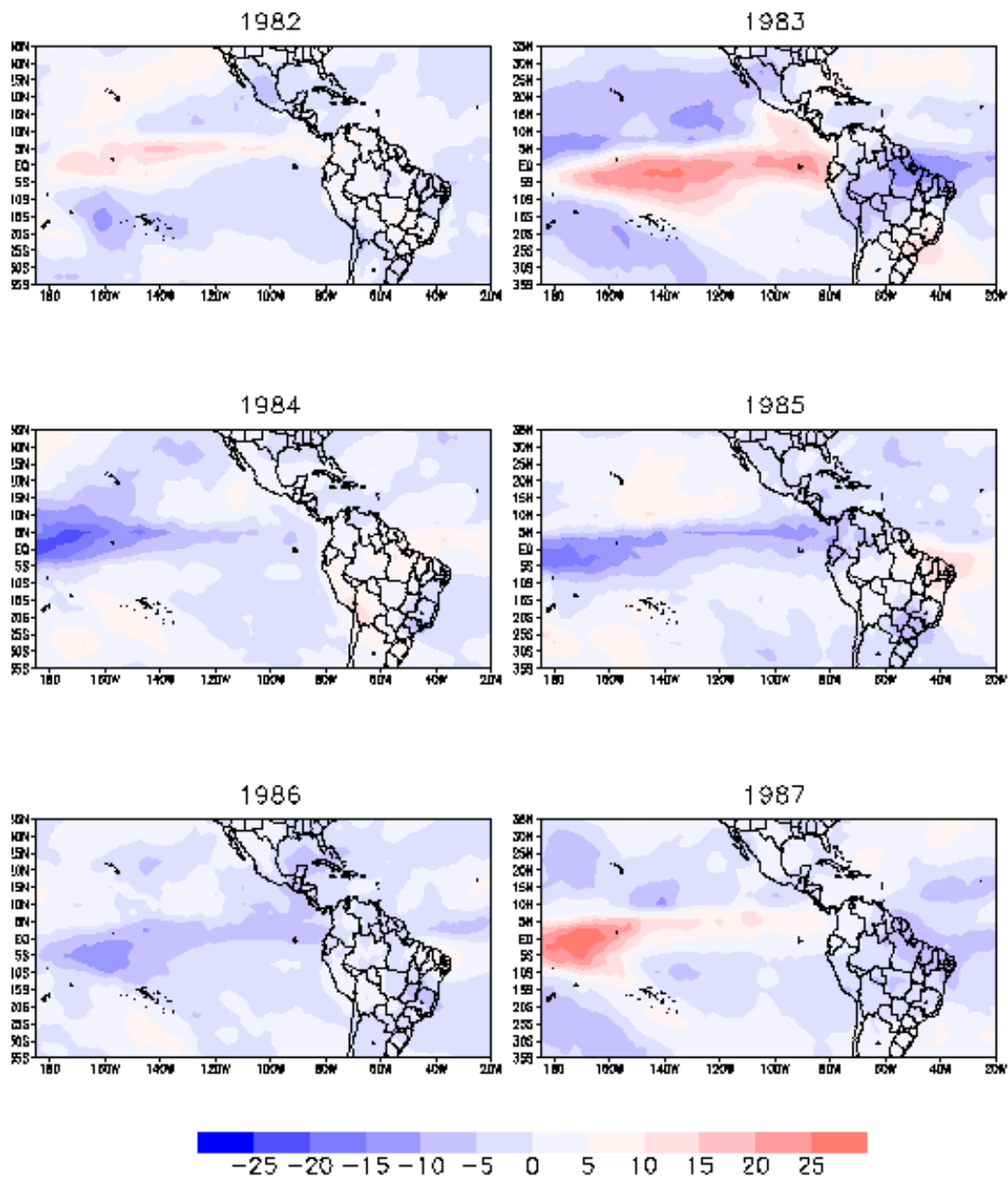


Fig. A.2 – Anomalia anual de ROL, Watts/m², de 1982 a 1993 (continua).

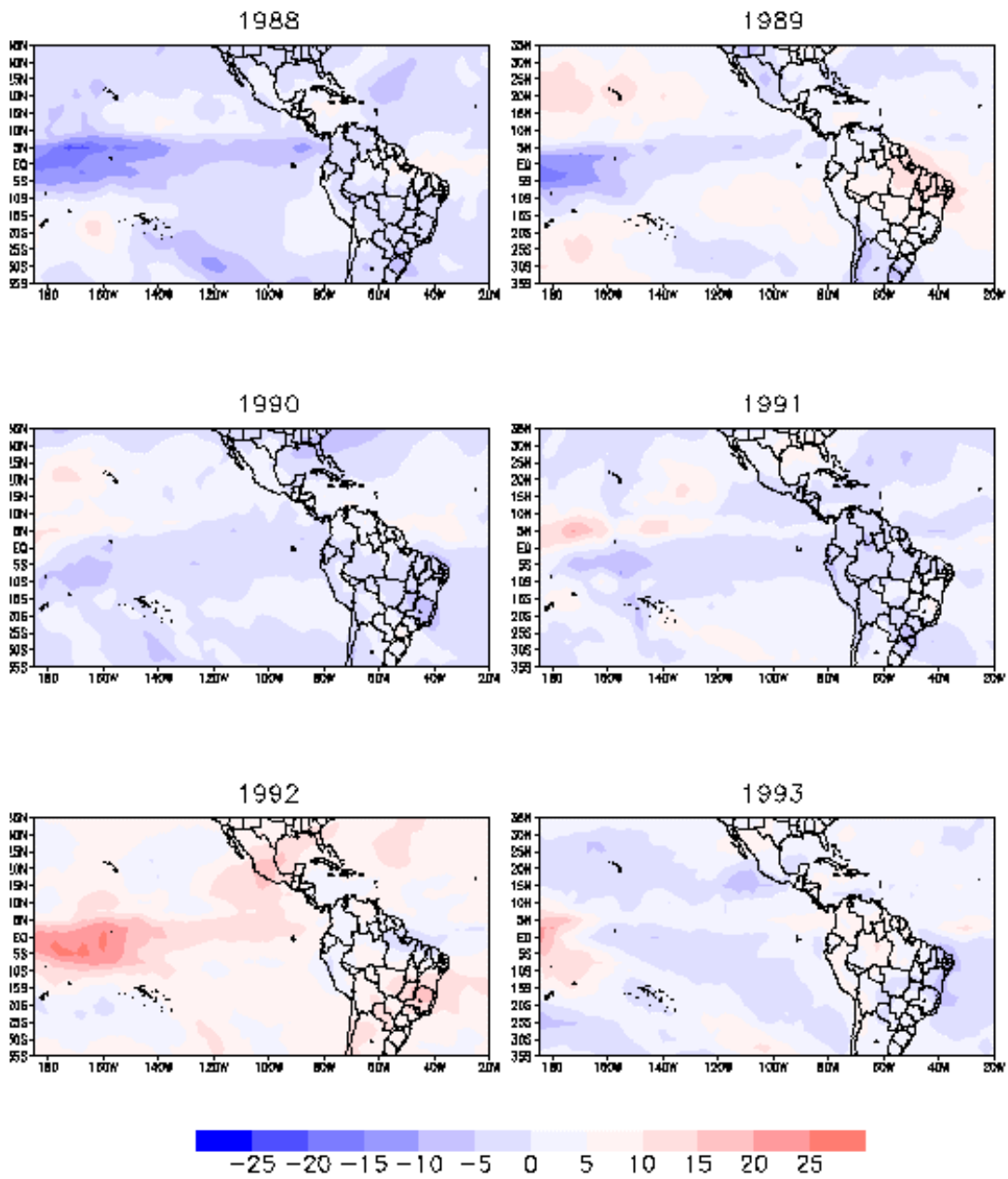


Fig. A.2 – Anomalia anual de ROL, Watts/m², de 1982 a 1993 (conclusão).

APÊNDICE B

MÉDIA MENSAL DE NDVI

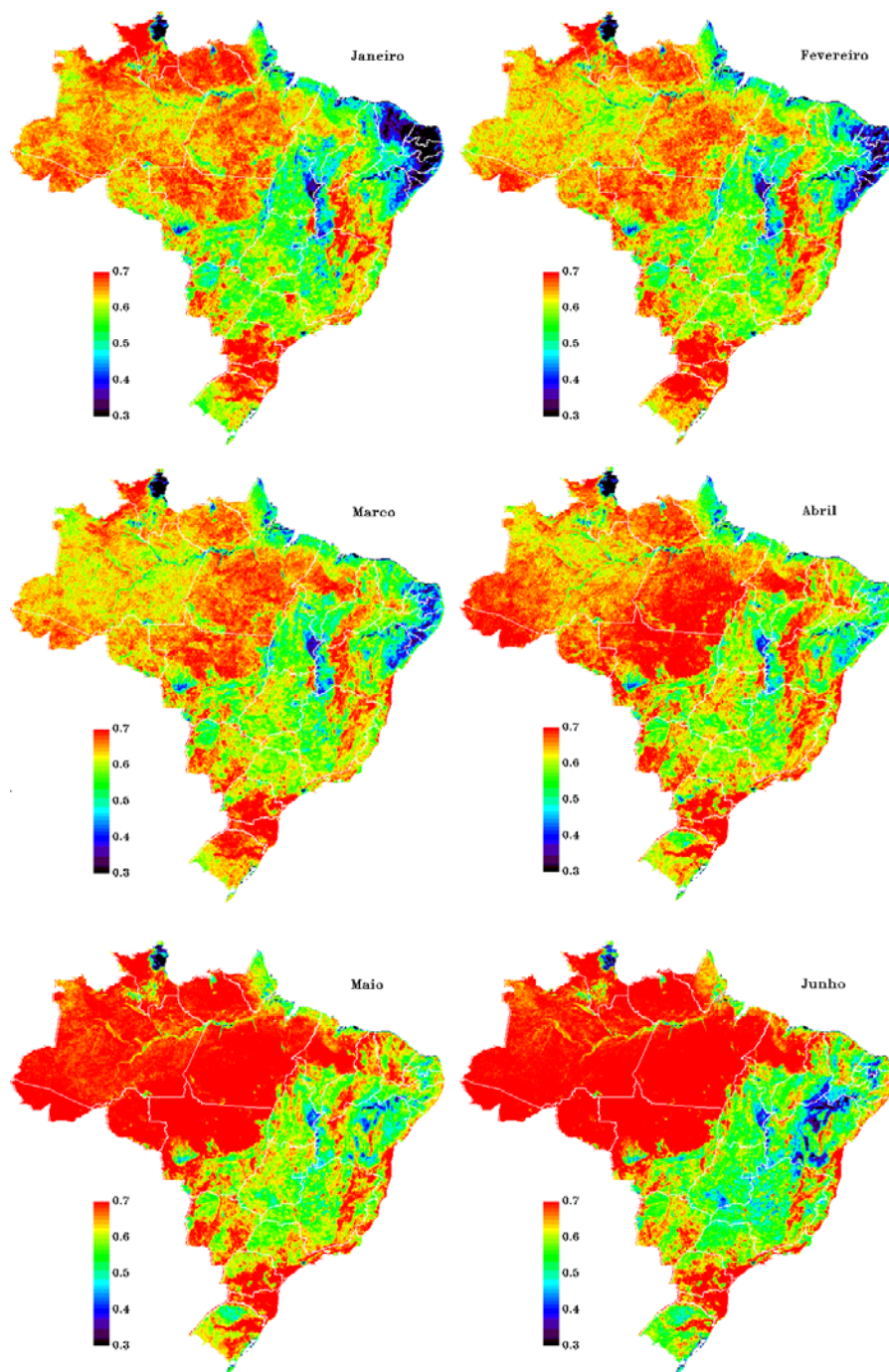


Fig. B.1 – Média mensal de NDVI do período de 1982 a 1993 (continua).

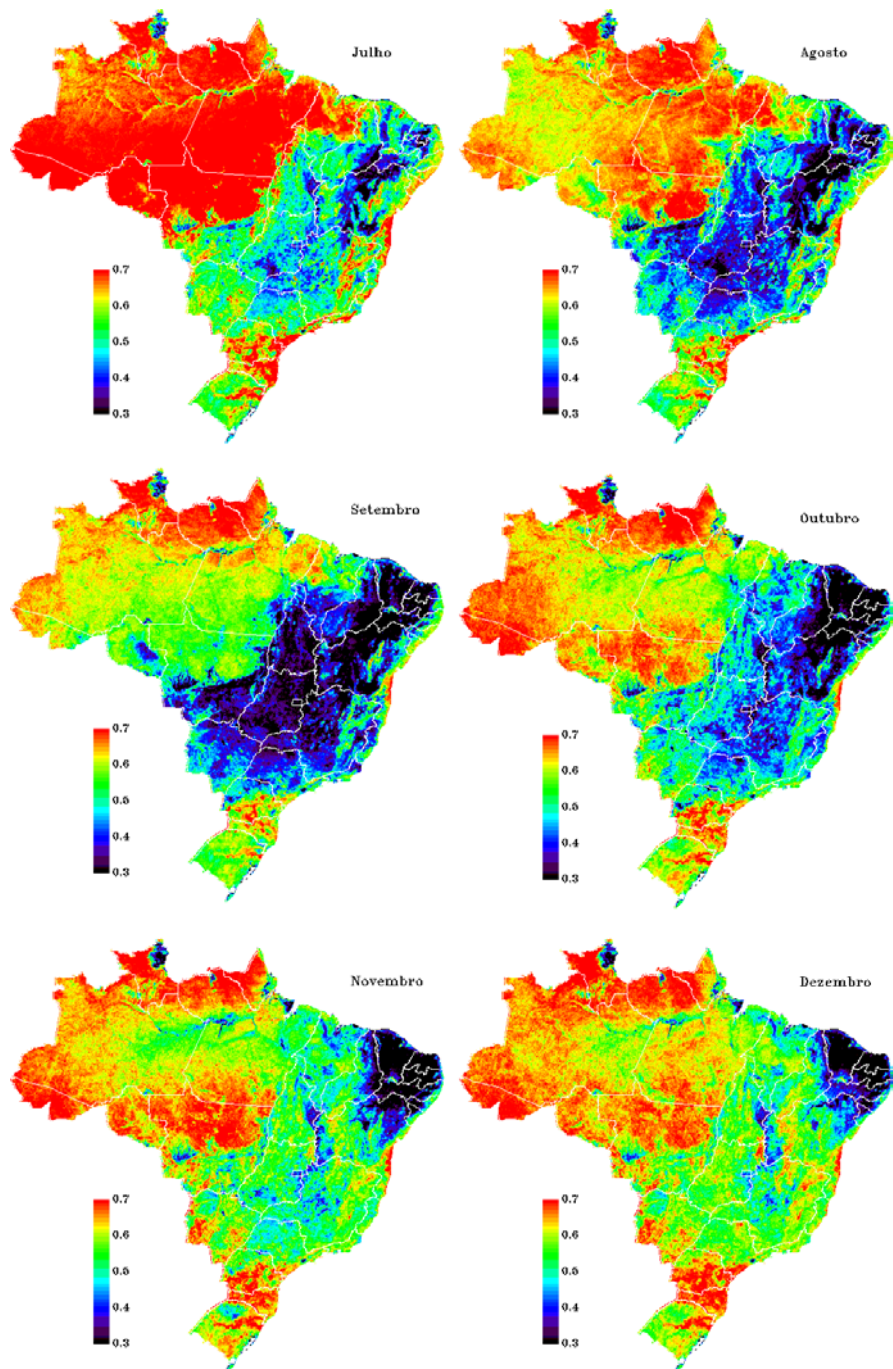


Fig.B.1 – Média mensal de NDVI do período de 1982 a 1993 (conclusão).