



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-6390-TDI/606

RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DERIVADO DO NOAA-AVHRR E PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO AMAZÔNICA

Eugênio Sper de Almeida

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo
Dr. Getúlio Teixeira Batista, aprovada em fevereiro de 1997.

528.711.7:581.54

ALMEIDA, E. S. de

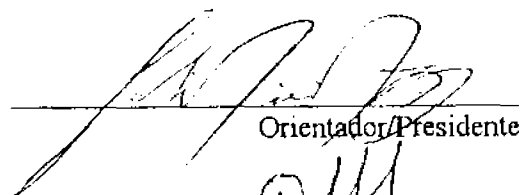
Relação entre índices de vegetação derivado
NOAA-AVHRR e precipitação na região Amazônica
/ E. S. de Almeida. - São José dos Campos:
INPE, 1997.

109 p. - (INPE-6390-TDI/606).

1. Índices de vegetação. 2. Precipitação.
3. Resolução multitemporal. 4. Satélites NOAA.
5. Radiômetro avançado de muito alta resolu-
ção. 6. AVHRR. 7. Amazonas (Região). I. Título.

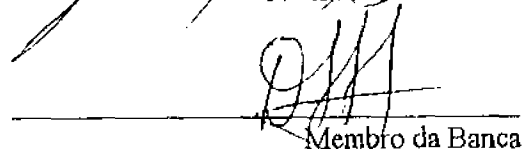
Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Getúlio Teixeira Batista



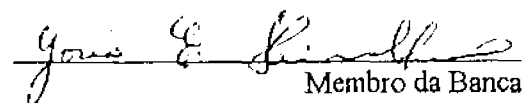
Orientador/Presidente

Dr. Diógenes Salas Alves



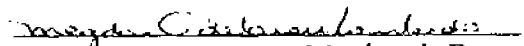
Membro da Banca

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro



Membro da Banca

Dra. Magda Adelaide Lombardo



Membro da Banca

- Convidada -

Candidato: Eugênio Sper de Almeida

São José dos Campos, 17 de fevereiro de 1997

À minha esposa, Lilian,
pelo apoio e amor durante este trabalho.
Ao meu filho Pedro Henrique.
À minha família, por ter proporcionado
meios para chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Getulio Teixeira Batista (DSR/INPE) pelas opiniões, discussões, esclarecimentos e ajuda durante todas as etapas.

Aos doutores Alberto Setzer (DSR/INPE), Diógenes Salas Alves (DPI/INPE), Gerald Banon (DPI/INPE), João Roberto dos Santos (DSR/INPE), Magda Lombardo (UNESP) e Yosio Edemir Shimabukuro (DSR/INPE) pelas sugestões e comentários a respeito da metodologia utilizada.

Ao Dr. Tom Dunne, Harvey Greenberg e Miles Logsdon (projeto EOS), pelo fornecimento de dados de precipitação registrado ao NDVI.

Ao Dr. Gilberto Câmara Neto (DPI/INPE), por ter apoiado o mestrado.

Aos coordenadores da pós-graduação em Sensoriamento Remoto.

Ao Ulf, Roberto e Rosana da FUNCATE pelo auxílio na consulta ao material do PRODES.

Aos colegas Camilo, Elaine, Eliana, Etel, Elizabete, Fábio, Fernando, Flávio, Gerardo, Helena, Izabel, Jorge, Jussara, Marinaldo, Moreira, Silvia e Simeão pelo apoio, sugestões e amizade.

Ao Dr. Carlos Nobre, Dr. Prakki Satyamurti, Patrícia e Letícia do CPTEC/INPE, pela compreensão e apoio.

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

RESUMO

Este trabalho analisou a relação entre a precipitação e o NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada) derivado do NOAA-AVHRR ("National Oceanic and Atmospheric Administration's - Advanced Very High Resolution Radiometer") na região Amazônica. Inicialmente foi feita uma revisão da literatura sobre o sensor AVHRR, o NDVI, a imagem NDVI gerada pelo grupo GIMMS ("Global Inventory Monitoring and Modeling Studies") da NASA/GSFC ("National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center"), os fatores que alteram o valor do NDVI (contaminação de nuvens, efeitos atmosféricos, ângulo de visada e iluminação e degradação dos sensores) e os principais trabalhos que analisam aplicações de índice de vegetação e que relacionam índices de vegetação com precipitação. Foram utilizadas duas metodologias para a análise da relação (linear e logarítmica) entre NDVI e precipitação mensal, para o período de janeiro/82 a dezembro/90. A primeira abordagem baseou-se na análise pontual sobre as estações meteorológicas, sendo utilizadas informações de precipitação proveniente do DNAEE e a média de 3x3 pixels NDVI que envolviam as estações. Das 486 estações terrestres do DNAEE com informações de precipitação, apenas 137 apresentaram mais de 70% de dados e áreas com cobertura vegetal original maior que 50% para o período estudado. Após feita a correção para a degradação do sensor, elaborou-se uma tabela com informações referentes ao nome da estação, coordenadas, tipo de cobertura vegetal original, porcentagem de dados úteis de precipitação, porcentagem de floresta e os coeficientes de correlação (para tempos de resposta de 1, 2 e a soma de dois meses entre a ocorrência da precipitação e a resposta do NDVI). A segunda abordagem avalia a correlação entre imagens NDVI geradas pelo grupo GIMMS e imagens de precipitação (interpoladas pela Universidade de Washington a partir de dados de precipitação de estações meteorológicas do DNAEE), gerando como produto final um mapa da correlação entre NDVI e precipitação. Em ambas as análises verificaram-se baixas correlações entre NDVI e precipitação na Amazônia ($r < 0,1$), para tempos de resposta do NDVI à precipitação de um, dois e a soma dos dois meses anteriores. Apenas nas áreas de cerrado foram observados coeficientes de correlação altos ($r > 0,6$ - verificado na análise multitemporal de imagens). Os resultados obtidos usando a abordagem pontual mostrou que tanto as relações linear como logarítmica apresentaram aproximadamente os mesmos resultados. Foi notada uma variação da correlação quando foi variado o tempo de resposta do NDVI à precipitação, sendo obtidos os melhores coeficientes de correlação para um tempo de 2 meses entre a ocorrência da precipitação e a resposta do NDVI.

RELATIONSHIP BETWEEN NDVI DERIVED FROM NOAA-AVHRR AND PRECIPITATION IN THE AMAZONIA REGION

ABSTRACT

This study analyzed the relationship between precipitation and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from NOAA-AVHRR ("National Oceanic and Atmospheric Administration's - Advanced Very High Resolution Radiometer") in the Amazon Region. First, the literature about the AVHRR sensor, the NDVI, the NDVI image generated by the GIMMS ("Global Inventory Monitoring and Modeling Studies") group of NASA/GSFC ("National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center"), factors that alter the NDVI value (cloud contamination, atmospheric effects, view angle and illumination and sensor degradation) and the literature that analyses vegetation index applications and especially the relationship between vegetation index and precipitation was reviewed. Two methodologies to analyze the relationship (linear and logarithmic) between NDVI and precipitation, in the period from January 1982 to December 1990 were tested. The first methodology was based on a punctual analysis over the meteorological stations, using precipitation information from DNAEE and the mean monthly NDVI over 3x3 pixels. From the total of 486 DNAEE's terrestrial stations with precipitation information, only 137 had both more than 70% of precipitation data and more than 50% of original vegetation cover. After a sensor degradation correction, a table containing the stations names, coordinates, original vegetation cover, percentage of useful precipitation data, forest cover percentage and correlation coefficients (for time lag of 1, 2, sum of two months between the occurrence of precipitation and the vegetation NDVI value) was built. A second approach investigated the relationship between the NDVI images generated by the NASA/GSFC GIMMS group and the precipitation image by the University of Washington based on ground stations data from DNAEE. Both approaches revealed low correlation coefficients ($r < 0.1$) between NDVI and precipitation for forested areas, for time lag of one, two and the sum of two past months between the occurrence of precipitation and the observed NDVI monthly maximum. Only in those stations located over "cerrado" areas, relatively high correlation coefficients ($r > 0.6$) were verified in the multitemporal analysis based on images of NDVI and precipitation. The results obtained using the punctual approach showed that both linear and logarithmic presented approximately the same results (low correlation coefficients). The correlation coefficients varied as a function of the time lag between the precipitation and NDVI; best results were found for the 2 months of the occurrence of precipitation prior the NDVI observation.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 Objetivo	2
2. <u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	3
2.1 Distribuição de precipitação na Amazônia.....	3
2.2 Sensor AVHRR ("Advanced Very High Resolution Radiometer").....	5
2.3 Índice de vegetação da diferença normalizada	9
2.4 Efeitos no NDVI.....	12
2.4.1 Efeitos devido à contaminação por nuvens.....	12
2.4.2 Efeitos atmosféricos	13
2.4.3 Efeitos devido ao ângulo de visada e iluminação	15
2.4.4 Efeito devido ao sensor	17
2.5 Aplicações dos índices de vegetação.....	20
2.6 Relação entre índice de vegetação e precipitação.....	22
3. <u>MATERIAIS E MÉTODO</u>	27
3.1 Área de estudo	27
3.2 Material.....	28
3.3 Método.....	35
3.3.1 Técnica de análise dos dados pontuais	35
3.3.1.1 Extração e manipulação dos dados pluviométricos do DNAEE ...	38
3.3.1.2 Determinação da cobertura vegetal sobre as estações pluviométricas.....	38
3.3.1.3 Avaliação da antropização nas estações pluviométricas selecionadas	39
3.3.1.4 Extração e manipulação dos dados NDVI das imagens.....	40
3.3.1.5 Calibração dos dados NDVI das imagens.....	42
3.3.1.6 Análise do sinal do dado NDVI.....	43
3.3.1.7 Determinação da correlação	44
3.3.2 Técnica de análise dos dados matriciais.....	45

4. <u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	47
4.1 Estações pluviométricas	47
4.2 Cobertura vegetal	47
4.3 Áreas antropizadas.....	48
4.4 NDVI contaminado por nuvens	49
4.5 Correlação	49
4.6 Análise de imagens multitemporais	59
5. <u>CONCLUSÕES</u>	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
APÊNDICE A - PROGRAMA PARA NAVEGAÇÃO DAS IMAGENS NDVI GERADAS PELO NASA/GSFC	75
APÊNDICE B - PROGRAMA PARA EXTRAÇÃO DA MÉDIA DE 3X3 PIXELS NDVI/GAC NO PERÍODO DE JANEIRO/82 A DEZEMBRO/90.....	79
APÊNDICE C - CALIBRAÇÃO DOS DADOS NDVI-GAC PARA DEGRADAÇÃO DO SENSOR.....	83
APÊNDICE D - PROGRAMA PARA GERAR MAPA DE CORRELAÇÃO LOGARÍTMICA ENTRE NDVI E PRECIPITAÇÃO - LAG=2	87

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Variação temporal da distribuição de precipitação trimestral.....	4
2.2 - Variação espacial da distribuição de precipitação.	5
2.3 - Assinaturas espectrais de diversos alvos: (a)vegetação; (b)solos; (c)rochas; (d)água; e (e)nuvens	11
2.4 - NDVI simulado para geometria de visada e iluminação durante o solstício de verão (a) e inverno (b) para vegetação, solo exposto e água.	16
3.1 - Área de estudo da análise pontual.	27
3.2 - Área de estudo da análise matricial.	27
3.3 - Mapa de vegetação, escala 1:5.000.000.	29
3.4 - Imagem NDVI (agosto/82).....	30
3.5 - Imagem NDVI (agosto/82) da região em estudo.....	33
3.6 - Imagem precipitação anual interpolada (1984).	34
3.7 - Diagrama do procedimento de análise pontual dos dados multitemporais.	37
3.8 - Diagrama de obtenção do NDVI de uma determinada coordenada da imagem.	42
3.9 - Distribuição do NDVI e da precipitação para o período de 9 anos.....	43
3.10 - Diagrama do deslocamento do vetor de precipitação em relação ao vetor de NDVI de: a) um mês; b) dois meses; e c) a soma de dois meses.....	44
3.11 - Diagrama da análise multitemporal da correlação entre imagens NDVI e precipitação.	46
4.1 - Exemplo de regiões ao redor de algumas estações pluviométricas: (a)Arapari; (b)Humboldt; (c)Badajós; (d)Beruri; (e)Cupari; (f)Monte Alegre; (g) Santo Antônio BR-364, (h)Fazenda Rio Branco.	48
4.2 - Variação do NDVI e da precipitação para o período de janeiro/82 a dezembro/90 (floresta ombrófila densa).....	56
4.3 - Variação do NDVI e da precipitação para o período de janeiro/82 a dezembro/90 (floresta ombrófila aberta).....	57
4.4 - Variação do NDVI e da precipitação para o período de janeiro/82 a dezembro/90 (área sem estação seca).....	58
4.5 - Histograma dos coeficientes de correlação entre imagens NDVI e precipitação.....	59
4.6 - Imagem Correlação.	60

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Características dos satélites da série NOAA.....	6
2.2 - Aplicações dos canais do AVHRR	7
2.3 - Bandas espectrais do AVHRR	8
2.4 - Horário de passagem pelo equador.....	9
2.5 - Efeitos atmosféricos da reflectância nos canais 1 e 2 e no NDVI.....	15
4.1 - Número de estações por tipo de vegetação predominante.....	47
4.2 - Classificação das estações pluviométricas por: tipo de vegetação dominante, % de dados pluviométricos disponíveis, % de cobertura vegetal original e coeficientes de correlação.	50
C.1 - Valores de Ganho de calibração (α) e fluxo solar(F_0).....	84
C.2 - Valores de coeficientes de calibração	84

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia Brasileira, muitas vezes referida como Amazônia Legal, foi criada pela Lei 5173 (Brasil, 1966), alterada pela Lei Complementar n° 31 (Brasil, 1977) e complementada pelo Art. 13 e seus parágrafos do Ato das Disposições Constitucionais Transitórias (Brasil, 1988). Ela possui atualmente 4.980.627,5 km², abrangendo 9 estados da Federação: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e a parte do Maranhão a oeste de 44°.

A Amazônia é um ambiente bastante diversificado, onde podem ser observados diversos tipos de formação vegetal: florestas, áreas de formações pioneiras, cerrado, áreas de tensão ecológica, campinarana e refúgio ecológico (IBGE e IBDF, 1994). Esta região possui também um significativa variabilidade espacial e temporal do clima, que pode ser notado pela variação na distribuição de precipitação sobre diversas regiões da Amazônia e em diferentes épocas do ano (Figueroa e Nobre, 1990).

No entanto, esta região não está densamente coberta por estações meteorológicas. A estimativa de parâmetros hidrológicos, tais como medidas de precipitação implicam na colocação de medidores de precipitação em locais representativos da região. Neste caso, o estabelecimento de uma relação entre precipitação e fenologia da vegetação pode servir para fornecer informações complementares sobre a precipitação em locais onde existam poucas estações meteorológicas, ou os dados são difíceis de se obter ou ainda são interrompidos. Desta forma é necessário que se estude a viabilidade de se utilizar métodos alternativos, para complementar as informações não disponíveis.

As imagens índice de vegetação geradas a partir do sensor AVHRR, têm sido uma importante fonte de dados na avaliação da precipitação. Existem estudos em regiões semi-áridas da África (Hielkema et al., 1986; Kerr et al., 1989; Nicholson et al., 1990; Justice et al., 1991a; Nicholson e Farrar, 1994 e no cerrado brasileiro (Assad et al., 1988, 1996) onde foram encontradas correlações significativas entre precipitação e índice de vegetação.

Produtos de Sensoriamento Remoto têm sido de grande utilidade na observação de recursos naturais da superfície terrestre. Os sensores AVHRR a bordo do satélite NOAA, são muito utilizados no acompanhamento da vegetação, devido a sua alta resolução temporal. A característica de cobertura diária da superfície terrestre proporciona o fornecimento de um grande volume de dados e ameniza problemas de cobertura de nuvens.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o de avaliar a relação entre índice de vegetação (derivado do NOAA-AVHRR) e precipitação na região Amazônica, utilizando as estações meteorológicas do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), partindo da hipótese que o NDVI é diretamente correlacionado com a fitomassa, que por sua vez é sensível à precipitação, e propor uma metodologia para análise multitemporal de imagens.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DISTRIBUIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO NA AMAZÔNIA

Segundo Figueroa e Nobre (1990), a Amazônia possui uma variação na distribuição espacial de precipitação que é observada tanto em áreas que possuem estação seca bem definida, como em áreas onde não existe estação seca. No aspecto da variação temporal nota-se uma oscilação da precipitação, em função do deslocamento do sol - durante o verão austral a precipitação é maior no hemisfério sul e durante o verão setentrional a precipitação é maior no hemisfério norte. No verão austral (Figura 2.1a) é observada uma região de alta precipitação com uma orientação NO-SE, com centro em 9°S/58°O. No decorrer dos meses de março-abril-maio (Figura 2.1b), as áreas de precipitação são orientadas no sentido leste-oeste, com deslocamento para o norte. No verão do hemisfério norte (Figura 2.1c), o centro de máxima precipitação mostra seu deslocamento máximo quando a precipitação na Venezuela é muito alta. Durante setembro-outubro-novembro (Figura 2.1d) o centro de máxima precipitação perde intensidade quando comparado com a estação anterior e move-se para oeste e sudoeste.

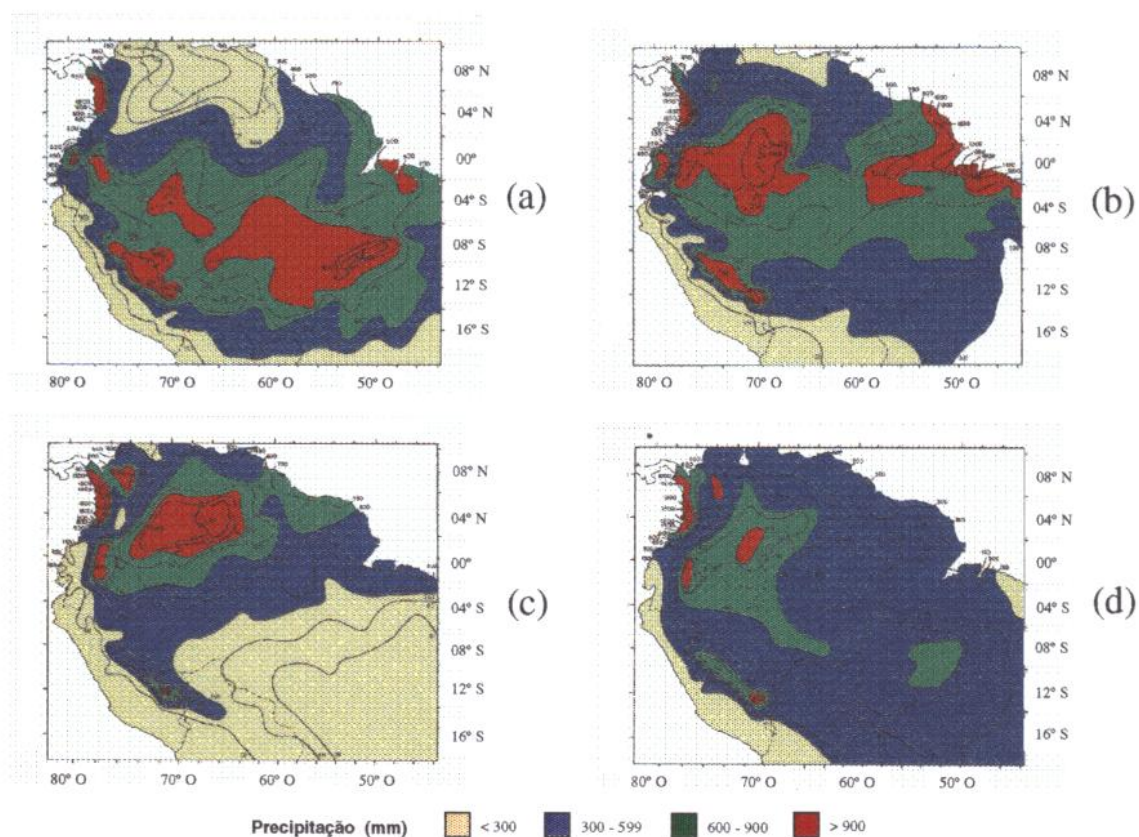


Fig. 2.1 - Variação temporal da distribuição de precipitação trimestral.

FONTE: Figueroa e Nobre (1990).

Para o caso da variabilidade espacial, mostrou-se a diferença na distribuição de precipitação anual (Figura 2.2), encontrando-se uma região de alta precipitação na Amazônia ocidental ao redor do equador (inexistência de estação seca) e uma diminuição significativa da precipitação na região de fronteira do Brasil-Venezuela-Guiana. Para a região Amazônica verifica-se uma faixa de valores de precipitação que vai de 0 mm/mês à ~1400 mm/mês.

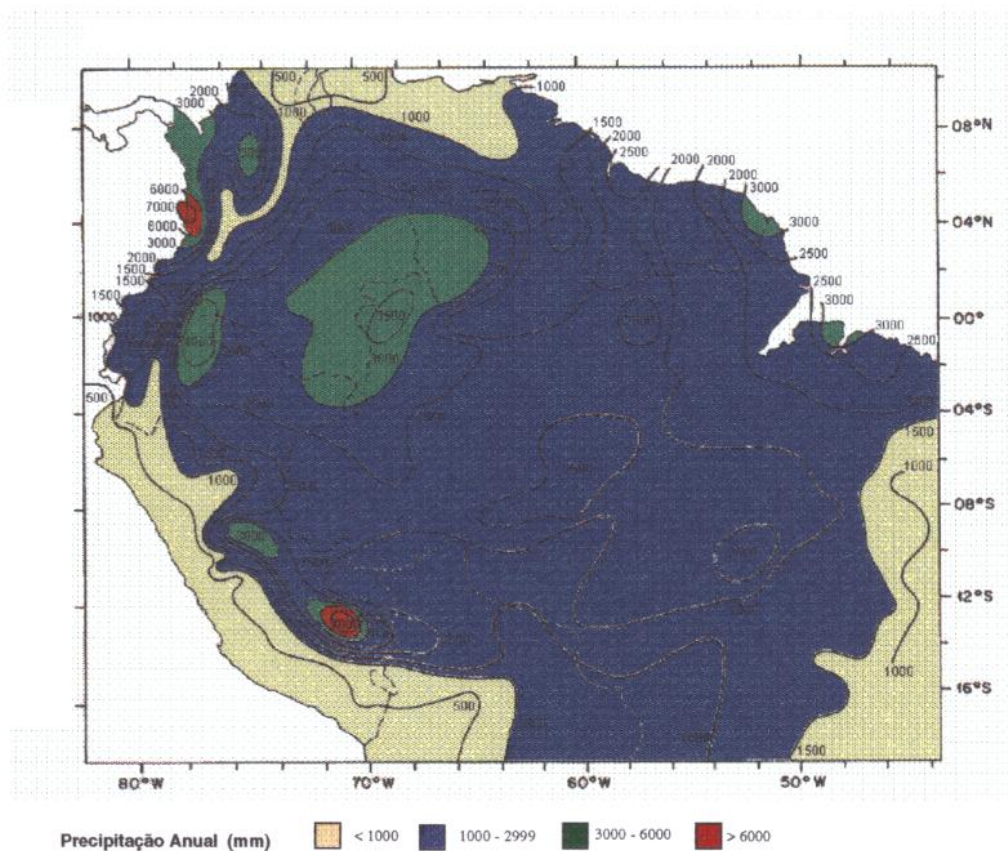


Fig. 2.2 - Variação espacial da distribuição anual de precipitação.

FONTE: Figueroa e Nobre (1990).

2.2 SENSOR AVHRR ("ADVANCED VERY HIGH RESOLUTION RADIOMETER")

Segundo Kidwell (1991), o sensor AVHRR é o mais versátil radiômetro de varredura já colocado a bordo de satélites meteorológicos, e um dos instrumentos mais importantes da carga útil dos satélites da série NOAA. Constitui-se de um radiômetro multiespectral que fornece imagens em vários canais no visível e no infravermelho, permitindo avaliações de vegetação, massas d'água, condições das nuvens, de gelo e temperaturas da superfície do mar, além de extração de outros parâmetros meteorológicos.

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DOS SATÉLITES DA SÉRIE NOAA

Campo de visada instantânea (IFOV)	1,4 miliradianos
Resolução no nadir	1,1 km
Altitude	833 km
Ângulo de varredura	155,4°
Faixa de imageamento	2400 km

FONTE: Adaptada de Kidwell (1995).

Segundo Kidwell (1995), os dados de alta resolução digitalizados ou quantificados são transmitidos pelo "High Resolution Picture Transmission" (HRPT). O HRPT é um modo operacional onde os dados do AVHRR, de todos os cinco canais, são continuamente transmitidos, em todo o globo, a uma resolução de 1,1 km.

Há equipamentos a bordo que processam dados AVHRR para produzir os dados amostrados, denominados "Global Area Coverage" (GAC), que terão sua resolução espacial reduzida. O procedimento realizado consiste em selecionar a primeira linha a cada sequência de um conjunto de três linhas varridas para gravação, sendo as outras duas linhas ignoradas. Ao longo da linha selecionada, a média de quatro pixels é utilizada, sendo o quinto pixel ignorado. O processo continua até o término da linha. Como resultado, a região registrada no dado GAC será de 1,1 km por 4,4 km, na região do nadir, que representa uma amostra de apenas 27% (amostra=4,84 km²; total=18,15 km²) da área imageada (Goward et al., 1993). Os dados GAC calculados durante uma passagem são gravados a bordo do satélite para transmissão futura sob comando das estações terrenas. A resolução de 10 bits por pixel por banda do dado AVHRR é mantida.

Existe também um modo chamado "Local Area Coverage" (LAC) no qual são gravados a bordo, dados de cobertura de áreas remotas de

interesse. Até 10% de cada órbita na resolução de 1,1 km em todos os cinco canais estão disponíveis e suas imagens são a única fonte de dados, destes satélites, para áreas remotas do globo. Tanto os dados LAC como os dados GAC são recebidos nas estações situadas no Alasca e na Virginia e são retransmitidos para Suitland (Maryland) para processamento central.

O AVHRR a bordo dos satélites TIROS-N, NOAA-6,-8,-10 possui 4 canais e o AVHRR a bordo dos satélites NOAA-7,-9,-11,-12,-13 possui 5 canais. No entanto, para manter o formato dos dados, o canal 4 é repetido quando apenas 4 canais estão disponíveis. O canal 1 opera na faixa do visível e os demais canais operam na faixa do infravermelho, sendo suas aplicações apresentadas na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 - APLICAÇÕES DOS CANAIS DO AVHRR

Canal	Aplicações
1	mapeamento diurno de nuvens, gelo e neve
2	delimitação de massas d'água, avaliação de vegetação (combinado com o canal 1)
3	mapeamento noturno de nuvens, temperatura da superfície do mar, detecção de queimadas e atividades vulcânicas
4	mapeamento diurno e noturno de nuvens, temperatura do mar, umidade do solo, atividades vulcânicas
5	temperatura do mar e umidade do solo

FONTE: Adaptada de Kidwell (1995).

Inicialmente o canal 1 possuía uma banda larga abrangendo toda região do visível, visto que se destinava apenas à visualização meteorológica. A partir do NOAA-6 (1979), esta banda larga foi reduzida à região do vermelho, o que possibilitou a utilização deste sensor para estudos de vegetação. As características espectrais do sensor AVHRR são mostradas na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 - BANDAS ESPECTRAIS DO AVHRR

Canais	TIROS-N	NOAA-6,-8,-10	NOAA-7,-9, -11,-12,-14
1	0,55-0,90 μm	0,58-0,68 μm	0,58-0,68 μm
2	0,725-1,10 μm	0,725-1,10 μm	0,725-1,10 μm
3	3,55-3,93 μm	3,55-3,93 μm	3,55-3,93 μm
4	10,5-11,5 μm	10,5-11,5 μm	10,3-11,3 μm
5	Repete Canal 4	Repete Canal 4	11,5-12,5 μm

FONTE: Adaptada de Kidwell (1995).

Apesar da vantagem de alta resolução temporal, este sensor possui a característica de gerar imagens com baixa resolução espacial, quando comparadas com aquelas provenientes de outros sistemas de sensoriamento remoto (e.g., LANDSAT e SPOT).

O sensor AVHRR do satélite NOAA permite monitoramento diário da superfície terrestre, pois ele fornece duas imagens diárias (uma durante o dia e a outra à noite). No entanto, devido ao deslocamento da órbita do satélite o horário de passagem do satélite pode variar, como mostra a Tabela 2.4.

TABELA 2.4 - HORÁRIO DE PASSAGEM PELO EQUADOR

Satélite	Ascendente		Descendente	
	lançamento	março/95	lançamento	março/95
TIROS-N	15:00		03:00	
NOAA-6	19:30		07:30	
NOAA-7	14:30		02:30	
NOAA-8	19:30		07:30	
NOAA-9	14:20	21:16	02:20	09:16
NOAA-10	19:30	17:53	07:30	05:53
NOAA 11	13:30	17:23	01:30	05:23
NOAA 12	19:30	19:15	07:30	07:15
NOAA 13	13:40		01:40	
NOAA 14	13:30	13:30	01:30	01:30

FONTE: Adaptada de Kidwell (1995).

2.3 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA

Um dos objetivos básicos de muitos projetos de sensoriamento remoto é caracterizar o tipo, a quantidade e a condição da vegetação presente na cena. Para efetuar essas caracterizações é necessário conhecer o comportamento espectral dos diferentes materiais presentes na superfície terrestre.

A energia eletromagnética ao incidir sobre uma superfície pode sofrer três tipos de interação: reflexão, transmissão e absorção. A quantidade de energia refletida, transmitida e absorvida é função da superfície e varia com o comprimento de onda da energia eletromagnética (Jackson e Huete, 1991).

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que envolvem a razão e/ou combinação linear entre bandas espectrais nas regiões do vermelho (0,6-0,7 μ m) e infravermelho próximo

(0,75-1,1µm), sendo largamente utilizados na avaliação da vegetação (Gutman, 1991).

As bandas espectrais do vermelho (Canal 1) e do infravermelho próximo (Canal 2) do sensor AVHRR, podem ser combinadas de diferentes formas, gerando uma grande variedade de índices de vegetação. Neste trabalho será utilizado o índice de vegetação da diferença normalizada (*"NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX"* - *NDVI*), proposto por Rouse et al. (1973).

$$\text{NDVI} = (\text{Canal 2} - \text{Canal 1}) / (\text{Canal 2} + \text{Canal 1})$$

O NDVI é sensível à presença da vegetação, pois a vegetação sadia usualmente diminui a resposta no vermelho devido à absorção por clorofila e aumenta a resposta no infravermelho próximo devido ao espalhamento pelos tecidos da folha (Tucker e Sellers, 1986), conforme mostra a Figura 2.3. Desta forma, alvos diferentes de vegetação (água, solo exposto, etc.) são facilmente distinguíveis devido as suas assinaturas espectrais características.

Segundo Baret e Guyot (1991), o NDVI aumenta o contraste entre solo e vegetação e minimiza os efeitos das condições de iluminação. No entanto, é sensível às propriedades ópticas do fundo (solo), visto que para um dado montante de vegetação, solos escuros resultam em altos valores de NDVI.

Segundo Jackson et al. (1983), um índice de vegetação ideal deve ser altamente sensível à vegetação, insensível às mudanças do

fundo (solo) e apenas levemente influenciado pela atmosfera. O NDVI analisado pelo autor não satisfaz este critério. O índice NDVI foi insensível às coberturas vegetais menores que 25%.

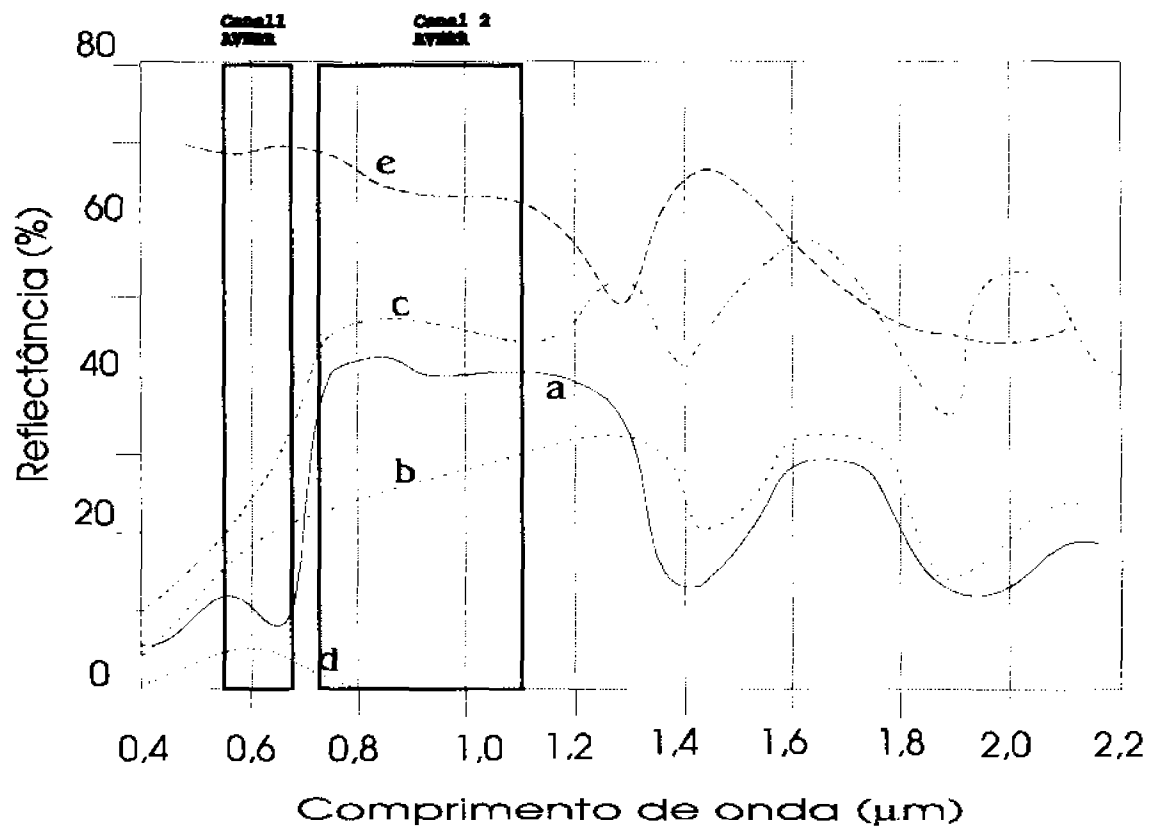


Fig. 2.3- Assinaturas espectrais de diversos alvos: (a) vegetação; (b) solos; (c) rochas; (d) água; e (e) nuvens

FONTE: Steffen e Moraes (1993), p.8.

Segundo Asrar (1989), a contribuição do fundo (solo) na resposta espectral é significativa em casos de cobertura vegetal esparsa, especialmente onde possam ocorrer grandes variações espaciais ou temporais da cobertura vegetal. Dosséis não contínuos dominam a maioria da superfície terrestre com exceção das florestas tropicais ou desertos.

2.4 EFEITOS NO NDVI

Na análise de imagens com baixa resolução, como é o caso das imagens índice de vegetação derivadas do sensor AVHRR, o pixel da imagem contém informações de diferentes alvos captadas pelo sensor. Com isto o pixel pode conter várias informações que dificultam sua identificação, além de sofrer influência de vários aspectos relativos à geometria de tomada dos dados, atmosfera e degradação do sensor.

2.4.1 EFEITOS DEVIDO À CONTAMINAÇÃO POR NUVENS

Segundo Sellers e Schimel (1993), o tempo de máximo desenvolvimento das nuvens nos trópicos, nas regiões úmidas do mundo, é mais ou menos coincidente com a passagem vespertina dos satélites NOAA-7, -9, -11. Nuvens aparecem bastante claras nos canais 1 e 2 (reflectâncias geralmente maiores que 0,35 em ambos canais) e possuem valores negativos baixos de NDVI (-0,05 a -0,2). A maior parte dos dados com nuvens pode ser identificada pela sua baixa temperatura e desta forma estes dados podem ser eliminados. Pixels misturados, que são parte nuvens e sombra de nuvens, e parte superfície terrestre, são difíceis de se identificar automaticamente e portanto é provável que sejam incorporados ao conjunto de dados. O efeito de sub-pixels de nuvens é especialmente sério para áreas com vegetação, sendo o efeito neste caso maior na reflectância do visível. Segundo Kaufman (1987), uma nuvem com reflectância de 0,5 na banda do visível que cobre 20% da área do pixel com reflectância da superfície de 0,05, pode aumentar a reflectância de superfície para 0,08. Estudos sobre distribuição de nuvem mostram que os subpixels de nuvens (<1,1 km) ocorrem frequentemente e que áreas com alta cobertura de nuvens coincidem com as áreas densamente vegetadas, significando que a

contaminação por nuvens é um sério problema para monitoramento de vegetação.

2.4.2 EFEITOS ATMOSFÉRICOS

A radiação eletromagnética na região do visível e infravermelho que chega no sensor é afetada por dois processos atmosféricos: (a) absorção devido a gases atmosféricos e aerossóis, e (b) espalhamento devido a moléculas e aerossóis.

A absorção por gases ocorre em) bandas específicas de absorção, pois depende da composição atômica e molecular de cada gás absorvedor. O espalhamento depende do tamanho dos componentes espalhadores, sua composição e concentração, bem como da distribuição do comprimento de onda do fluxo radiante. Por esta razão, todos os gases atmosféricos contribuem para o espalhamento e seus efeitos combinados são computados em função da densidade e pressão atmosférica.

Asrar (1989), Justice et al. (1991b) e Tanré et al. (1992) mostraram que devido ao vapor de água, existe uma banda de absorção fraca na faixa do canal 1 do AVHRR (0,57-0,70 μ m); uma banda de absorção muito mais forte na faixa do canal 2 (0,71-0,98 μ m) entre 0,90-0,98 μ m; e duas outras bandas fracas: uma centrada em 0,72 μ m e outra entre 0,80-0,84 μ m. A banda de absorção por vapor d'água diminui a radiância captada pelo sensor na região do infravermelho, o que causa uma diminuição no valor do NDVI com o aumento do vapor d'água na atmosfera.

Devido ao ozônio (O₃), existe uma banda de absorção fraca no canal 1, que não é saturada e depende da massa de ar, produzindo

um aumento no valor do NDVI com o aumento de seu conteúdo na atmosfera.

O oxigênio (O_2) possui uma banda de absorção forte e estreita em $0,76\mu m$ (canal 2). Tanré et al. (1992) e Holben (1986) verificaram que devido a saturação da banda de absorção do oxigênio, a absorção não depende do conteúdo de O_2 (volume), resultando em pequena diminuição do NDVI.

O espalhamento molecular é também conhecido como espalhamento Rayleigh. O espalhamento diminui em função do comprimento de onda, grosseiramente em função de λ^{-4} .

Aerossol atmosférico refere-se à matéria líquida ou sólida em suspensão, sendo seus efeitos ópticos dependentes das características físicas das partículas (distribuição de tamanho, índice de refração, forma de partícula e distribuição espacial da partícula), sendo as mesmas prejudiciais à análise quantitativa do efeito dos aerossóis e possível correção. A energia eletromagnética, ao interagir com os aerossóis, é absorvida ou espalhada. O espalhamento é espectralmente dependente, sendo a sua espessura óptica decrescente, a grosso modo, em função de λ^{-1} . A absorção depende do volume das partículas na atmosfera. Ambos afetam qualquer combinação usando os dois canais (Asrar, 1989).

Como pode-se notar, a contribuição atmosférica pode ser causada por efeitos invariantes (espalhamento molecular e absorção por oxigênio) como também por efeitos variantes (absorção por vapor d'água e aerossóis). A Tabela 2.5 apresenta de uma forma simplificada a influência dos diferentes componentes da atmosfera sobre o NDVI.

Segundo Soufflet et al. (1991), a reflectância de nuvens é aproximadamente igual nos canais 1 e 2 do AVHRR, isto acarreta uma diminuição no valor do NDVI. Como o NDVI utiliza geralmente o maior valor de nível de cinza dentro de um período (i.e., 30 dias), o efeito das nuvens é minimizado a menos que a região em estudo seja frequentemente coberta por nuvens, como algumas partes da região Amazônica.

TABELA 2.5 - EFEITOS ATMOSFÉRICOS NA REFLECTÂNCIA NOS CANAIS 1 E 2 E NO NDVI

	Canal 1	Canal 2
Ozônio	Diminui a reflectância de 5-15%.	Nenhum efeito.
	Aumenta o NDVI de 0,00 a 0,03 para áreas com vegetação esparsa.	
Espalhamento	Aumenta a reflectância de 0,02-0,07%.	Aumenta a reflectância de 0,005-0,025%.
Molecular	Diminui o NDVI de 0,00 a 0,10 para áreas com vegetação densa.	
Aerossóis	Aumenta a reflectância de 0,02-0,08% para névoa moderada e de 0,10-0,15% alta turbidez.	Mesmo efeito que o canal 1.
	Diminui o NDVI de 0,00 a 0,20 para áreas com vegetação densa.	
Vapor d'água	Diminui a reflectância de 0,0-0,5%.	Diminui a reflectância de 10-30%.
	Diminui o NDVI de 0,01 a 0,10 para áreas com vegetação esparsa.	

FONTE: Baseada em Tanré et al. (1992), p. 238.

2.4.3 EFEITOS DEVIDO AO ÂNGULO DE VISADA E ILUMINAÇÃO

O sensor AVHRR pode obter dados de ângulos de visada de até $\pm 55,4^\circ$ fora do nadir e de uma larga faixa de condições de iluminação que variam com a latitude e época do ano (Gupta, 1992).

Holben (1986) mostrou através da Figura 2.4 que o NDVI é máximo para cada tipo de cobertura nas visadas próximas ao nadir e pequenos ângulos zenitais. A seleção do pixel de maior valor na composição do NDVI mensal resulta na utilização de geometria de visada próxima ao nadir (nadir $\pm 10^\circ$), porque isto diminui o caminho da energia eletromagnética, que necessariamente reduz a influência da atmosfera no sinal e minimiza os efeitos direcionais da superfície, que podem ser substanciais para vegetação sadia.

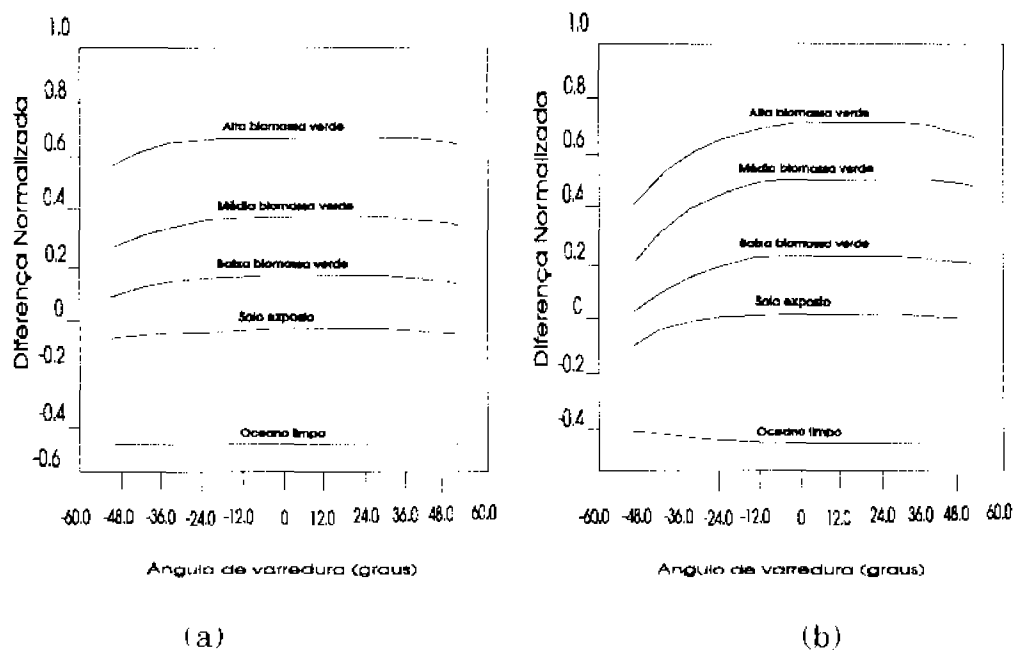


Fig. 2.4 - NDVI simulado para geometria de visada e iluminação durante o solstício de verão (a) e inverno (b) para vegetação, solo exposto e água.

FONTE: Adaptada de Holben (1986).

A Figura 2.4a mostra uma diminuição do NDVI relativo a Figura 2.4b para cada um dos três tipos de cobertura devido a variação de ângulo zenital de 20° para 47° , ao longo da linha de varredura do AVHRR

na latitude 30°, por causa da mudança sazonal. Pode ser notado que esta aparente resposta ao ângulo zenital também inclui o efeito do azimute solar, levando em conta o efeito total da geometria de iluminação.

Esta simulação sugere que na composição multitemporal de imagens estão incluídos dados que possuem os menores ângulos zenitais, e da mesma forma minimizando sombras, que diminuem o valor do NDVI.

Gutman (1991) analisou o efeito das condições de iluminação, isto é, as mudanças no ângulo zenital solar. A variabilidade na elevação solar foi importante para a comparação de coberturas vegetais em latitudes e estações diferentes. O autor verificou que uma diminuição do NDVI com o aumento do ângulo zenital. Como resultado do efeito de sombreamento, ele concluiu que ao se realizar correções para ângulo solar deve-se considerar a anisotropia da superfície.

2.4.4 EFEITOS DEVIDO AO SENSOR

Durante seu período de operação o sensor sofre um processo de degradação que tem como consequência uma mudança gradual no valor do NDVI, distorcendo seus valores para uma comparação multitemporal. Outro fator de distorção é a diferença existente entre os diferentes sensores AVHRR em órbita. Existem estudos que tratam a degradação dos sensores para os canais 1 e 2 individualmente. No caso das bases de dados NDVI já existentes, que utilizaram uma grande quantidade de imagens para sua geração, esta não é uma solução prática, pois isto demandaria um custo de processamento computacional muito alto para a calibração dos canais separadamente e posterior geração dos valores NDVI calibrados.

Los (1993), estudou o efeito da degradação do sensor para uma faixa larga de NDVI ($0 < \text{NDVI} < 0,6$) e a possibilidade de ajuste do NDVI já processado, sem ter que recorrer aos canais 1 e 2 originais.

Inicialmente, o autor considerou o número digital para valores de reflectância de cada um dos canais ($i=1, 2$).

$$\rho_{i,p} = \gamma_{i,p}(C_i - C_{0,i,p})$$

onde $\rho_{i,p}$ é a reflectância da banda i de pré-lançamento, $\gamma_{i,p}$ é o coeficiente de calibração de pré-lançamento, C_i é o número digital de visada do espaço real (gravado em fita magnética) e $C_{0,i,p}$ é o número digital de visada do espaço de pré-lançamento.

O sensor AVHRR não é equipado com calibração a bordo dos canais 1 e 2, por isto são utilizadas medidas de pré-lançamento. O autor analisa três métodos que relacionam NDVI_t (real) com NDVI_p (calibração de pré-lançamento).

O NDVI é dado por:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

onde ρ_1 é a reflectância do canal 1 (vermelho) e ρ_2 é reflectância do canal 2 (infravermelho próximo).

O primeiro modelo assume que a diferença entre NDVI_t e NDVI_p é aproximadamente constante para toda faixa de valores do NDVI.

$$NDVI_t \approx NDVI_p + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta NDVI}{n}$$

onde $\Delta NDVI = NDVI_t - NDVI_p$ e n é o número de observações.

O "offset" pode ser calculado através da diferença média no NDVI de um determinado número de combinações seleccionadas dos canais 1 e 2 que representam diferentes tipos de superfície ou como a diferença entre NDVI de regiões invariantes como desertos.

Os outros dois modelos propostos determinam $NDVI_t$ de maneira independente de $\rho_{i,p}$. A primeira forma é negligenciar a diferença na contagem do espaço, como mostra o modelo 2 abaixo:

$$NDVI_t \approx \frac{r_1 SR_p - r_2}{r_1 SR_p + r_2}$$

onde r_1 e r_2 é a degradação do sensor definida como a razão entre coeficientes de pré-lançamento e real ($\gamma_{1,p}/\gamma_{1,t}$ e $\gamma_{2,p}/\gamma_{2,t}$, para os canais 1 e 2, respectivamente) e SR_p é a razão simples $\rho_{2,p}/\rho_{1,p} = (1+NDVI_p)/(1-NDVI_p)$.

A segunda forma considera a contagem do espaço. Para isto os valores reais de reflectância são plotados conjuntamente com SR_t . A partir desta curva é obtida a relação entre $\rho_{1,t}$ e SR_t :

$$\frac{1}{\rho_{1,t}} = a + b * SR_t \quad (2.1)$$

Combinando valores de $\rho_{1,t}$ e SR_t obtidos sobre a África, Los (1993) encontrou valores de $a=-4,34$ e $b=7,48$ com coeficiente de

correlação de 0,93. A combinação das Equações 2.1 e 2.2 resultam no terceiro modelo.

$$NDVI_i = \frac{r_1(SR_p + \frac{\Delta_{2,p}}{a+b \cdot SR_i}) - r_2(1 + \frac{\Delta_{1,p}}{a+b \cdot SR_i})}{r_1(SR_p + \frac{\Delta_{2,p}}{a+b \cdot SR_i}) + r_2(1 + \frac{\Delta_{1,p}}{a+b \cdot SR_i})} \quad (2.2)$$

onde $\Delta_{i,p} = \gamma_{i,p} \cdot (C_i - C_{0,i,p})$

Os valores de NDVI calibrados, usando o terceiro modelo, foram comparados com valores utilizando calibração individual dos canais. Apesar dos resultados obtidos não apresentarem a mesma precisão da correção aplicada aos canais individualmente, ele fornece um meio rápido e fácil para corrigir o NDVI uma vez processado, com economia substancial de processamento.

Dentro dos modelos analisados, o terceiro modelo apresentou melhores resultados, sendo a ordem de grandeza do erro introduzido por este método de 0,01% a 0,7% sobre um NDVI de 0,3. No entanto, encontrou-se deficiência em situações onde os valores dos canais 1 e 2 são baixos, e onde o canal 1 é maior que o canal 2 ($NDVI < 0$). Estes valores são geralmente associados a superfícies escuras, como corpos d'água ou áreas com sombra de nuvens.

2.5 APLICAÇÕES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Tucker (1979), trabalhando na Floresta Nacional de Pawnee, avaliou e quantificou as relações entre várias combinações lineares da radiância do vermelho e do infravermelho com dados de biomassa, conteúdo de água na folha e conteúdo de clorofila de lotes experimentais. O

autor utilizou o NDVI na análise de dosséis de gramíneas nos meses de setembro/71, junho/72 e outubro/72. Para junho e setembro foram encontrados coeficientes de correlação de 0,89 e 0,71, respectivamente, entre o NDVI e a biomassa fotossinteticamente ativa. Para o mês de outubro, que apresentava aproximadamente 80% das folhas da vegetação mortas, não foi encontrado correlação entre NDVI e a biomassa fotossinteticamente ativa.

Tucker et al. (1985a) analisaram dados NDVI do sensor AVHRR, durante as estações chuvosas e de crescimento de culturas, na zona do Sahel, à nordeste do Senegal. A relação linear entre o NDVI e os dados de biomassa rasteira (integrados), de 1981 a 1983, resultaram em um r^2 de 0,69.

Justice et al. (1985) utilizaram o NDVI para monitorar a dinâmica sazonal da vegetação em várias regiões (na África, Índia, China e América do Sul). Tucker et al. (1985b) também utilizaram o NDVI para monitorar a dinâmica da vegetação e classificar a cobertura terrestre na África.

Wiegand e Richardson (1990a,b) verificaram que a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FPAR) pode ser estimada através de índice de vegetação como o NDVI, analisando três diferentes culturas durante um ano. Também foi obtida uma alta correlação entre os índices de vegetação analisados, e o índice de área foliar e a fitomassa aérea.

Liu (1990), utilizando composições de 15 dias de NDVI durante 1981 a 1987 demonstrou a evolução temporal da cobertura vegetal de várias regiões do Brasil. Para a região da floresta tropical Amazônica, o valor de NDVI encontrado manteve-se acima de 0,5 durante quase todo

período, com exceção do período seco. Os valores baixos obtidos durante o período chuvoso foram eliminados, pois foram associados a nuvens. Para a região do semi-árido, o valor de NDVI aumentou rapidamente com a precipitação, e em muitas partes desta região, o NDVI revelou-se bastante correlacionado com o montante de precipitação do mês anterior. Nas regiões metropolitanas foram encontrados valores baixos de NDVI, enquanto que em áreas costeiras foram encontrados valores quase negativos. A média dos valores, analisados nas regiões costeiras e metropolitanas, apresentou uma alta variação que foi notada pelo desvio padrão alto encontrado nestas regiões. Para as regiões restantes, o NDVI respondeu ao crescimento das culturas. Isto indica que a variação espacial e temporal dos valores de NDVI podem ser uma ferramenta útil na previsão do crescimento de culturas e na estimativa produtividade, das mesmas nessas regiões.

Santos e Shimabukuro (1993), analisando o cerrado brasileiro, verificaram que aqueles de porte arbóreo possuem valor médio anual de NDVI (0,40) maior que os cerrados de porte herbáceo/arbustivo (0,32), porque os primeiros apresentam uma maior fitomassa foliar. O comportamento sazonal de ambos é idêntico, possuindo valores máximos na estação chuvosa e valores mínimos na época seca.

2.6 RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

Hielkema et al. (1986) utilizando dados NDVI para um período de 10 dias (com uma janela de 3x3 "pixels") na zona de savana da República Democrática do Sudão e dados de precipitação, encontraram coeficientes de correlação maiores que 0,7. Os dados referentes ao ano de 1980 (ano com precipitação abaixo do normal) apresentaram valores de NDVI maiores que os dos anos de 1983 e 1984 (anos de seca), para uma

mesma quantidade de precipitação. Isto indica uma baixa eficiência no uso da água nos anos de 1983 e 1984, que pode ser atribuído ao aumento do “run-off” devido a baixa cobertura vegetal, vegetação perene menos vigorosa e aumento da perda direta do solo por causa da baixa cobertura vegetal.

Assad et al. (1988), analisando imagens índice de vegetação semanais sobre o estado de Minas Gerais (setembro de 1982 a março de 1983 e setembro de 1983 a março de 1984), encontraram coeficiente de correlação de 0,77 entre os valores de índice de vegetação e precipitação para as 84 estações pluviométricas analisadas. Os autores também verificaram que o índice de vegetação aumentou apenas no período posterior a um período de forte precipitação, devido ao fato da cobertura vegetal necessitar de um tempo para absorver a água disponível e aumentar sua capacidade fotossintética e evapotranspirativa.

Kerr et al. (1989), analisaram dados GVI (Global Vegetation Index) do NOAA-7 AVHRR e valores de precipitação de 59 estações pluviométricas durante a época chuvosa do ano de 1986 no Senegal. Foi encontrado coeficiente de correlação de 0,84 entre os valores mensais acumulados de precipitação das estações e GVI acumulado para o fim do mês de junho. Para o fim da estação (outubro) encontrou-se coeficiente de correlação de 0,86. Os autores criaram uma metodologia para derivar imagens de precipitação a partir das imagens GVI, a partir de uma regressão linear extraída entre ambas variáveis. Este mapa é muito mais detalhado que qualquer mapa produzido para a região e fornece informações sobre regiões que não são cobertas por estações meteorológicas. Este método, no entanto, necessita de validação para vários anos e não se mostrou eficiente para áreas de vegetação esparsa.

Nicholson et al. (1990) analisando a relação entre precipitação e NDVI no leste da África (Quênia e Tanzânia) e no Sahel (Niger e Mali), durante o período de 1982 a 1985, verificou que a maior correlação entre NDVI e precipitação ocorreu quando o NDVI de um determinado mês foi comparado com a precipitação no mesmo mês mais os dois meses anteriores. Sendo este fato devido provavelmente a vegetação não responder diretamente à precipitação, mas sim à umidade do solo. Os diagramas NDVI x precipitação mostraram uma relação log-linear entre NDVI e precipitação no leste da África (região com florestas e vegetação arbustiva) e uma relação mais linear no Sahel (região com vegetação arbustiva e herbácea). Em geral, o valor do NDVI aumenta linearmente até ~200 mm/mês e apresenta pouca mudança com o aumento da precipitação após este montante, mostrando que acima de 200 mm/mês a precipitação tem pouca influência sobre a vegetação, quando monitorada pelo NDVI. Para o leste da África foi obtido um coeficiente de correlação de 0,82 (curva NDVI x precipitação com comportamento linear) e de 0,89 (curva NDVI x precipitação com comportamento logarítmico). Para o oeste da África, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,96 (curva NDVI x precipitação com comportamento linear) enquanto que o Sahel sugeriu uma tendência para uma relação log-linear.

Justice et al. (1991a) relacionaram imagens de precipitação estimadas a partir de dados Meteosat com imagens NDVI no Oeste Africano durante as estações chuvosas de 1985 e 1986. Também foi analisada a correlação entre a evapotranspiração e o NDVI gerada a partir do dado HRPT. A evapotranspiração foi determinada utilizando um modelo que utilizava precipitação, "runoff", água armazenada e parâmetros agrônômicos. A curva de evapotranspiração foi deslocada em 20 dias e ajustou-se a curva de NDVI. Isto mostrou que existe um período de

aproximadamente 20 dias entre a ocorrência de um fator fisiológico (evapotranspiração) e seu efeito sobre o NDVI.

Batista et al. (1993) analisando o NDVI para várias coberturas vegetais da região Norte do Brasil observaram uma diminuição dos valores de NDVI em consequência do efeito do fenômeno El Niño no ano de 1983, que provocou uma diminuição da precipitação na região.

Segundo Nicholson e Farrar (1994), existem inúmeros estudos que sugerem uma relação linear entre NDVI e precipitação, com o NDVI aumentando com a precipitação no semi-árido Africano. No entanto, analisando o semi-árido de Botswana (África), os autores verificaram que esta relação é mais complexa, ocorrendo esta linearidade entre esses dois parâmetros apenas na faixa de 25-200 mm (mensal) e 200-1200 mm (anual). Acima desta faixa, o NDVI aumenta lentamente com o aumento da precipitação ou se mantém constante. Nicholson e Farrar (1994), também constataram que a resposta do NDVI à precipitação é dependente do tipo de vegetação e de sua localização geográfica.

Assad et al. (1996), conseguiram determinar 8 grupos homogêneos relacionados com chuva e índice de vegetação nos cerrados brasileiros. Verificaram também que, na maioria dos casos, o índice de vegetação responde três meses após a ocorrência da precipitação.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho teve como região de estudo a Amazônia brasileira. A metodologia adotada enfocou uma análise pontual e outra matricial.

Na análise pontual, foi meteorológicas considerada as regiões da Amazônia ao redor das estações pluviométricas do DNAEE (Figura 3.1).



Fig. 3.1 - Área de estudo da análise pontual.

Na análise matricial, foi considerada a região da Amazônia compreendida entre as coordenadas 1°N-14°S e 53°O-69°O (Figura 3.2).



Fig. 3.2 - Área de estudo da análise matricial.

Segundo o IBGE e IBDF (1994), a Amazônia Legal é coberta em sua maior parte por florestas, mas existem outros tipos de vegetação como cerrados, pastagens, capoeiras e outros elementos como água (rios, represas e lagos), solo exposto, estradas e construções. Nesta região são encontrados os seguintes tipos fisionômicos-ecológicos de formações vegetais:

- Floresta ombrófila densa;
- Floresta ombrófila aberta;
- Floresta estacional decidual;
- Floresta estacional semidecidual;
- Área de formações pioneiras;
- Cerrado;
- Área de tensão ecológica;
- Campinarana;
- Refúgio ecológico.

3.2 MATERIAL

Verificou-se a relação entre precipitação e NDVI através da execução de análises pontuais (utilizando-se de dados de estações pluviométricas terrestres) e matriciais (imagens NDVI x precipitação), utilizando-se as seguintes fontes de informação referentes à região Amazônica:

- a) Dados do Projeto de Desflorestamento da Amazônia (PRODES).

Este projeto utilizou dados dos sensores MSS e TM para a avaliação do desflorestamento da Amazônia. Para a identificação de áreas desflorestadas, de florestas, de não florestas (cerrados) e principais corpos

d'água utilizou-se 229 cenas do sensor TM, que cobrem a região. Estas cenas foram convertidos em 334 mapas, utilizando-se como base cartas topográficas na escala 1:250.000 (Alves et al., 1992).

b) Um mapa de vegetação original (Figura 3.3), na escala 1:5.000.000 (IBGE e IBDF, 1994);

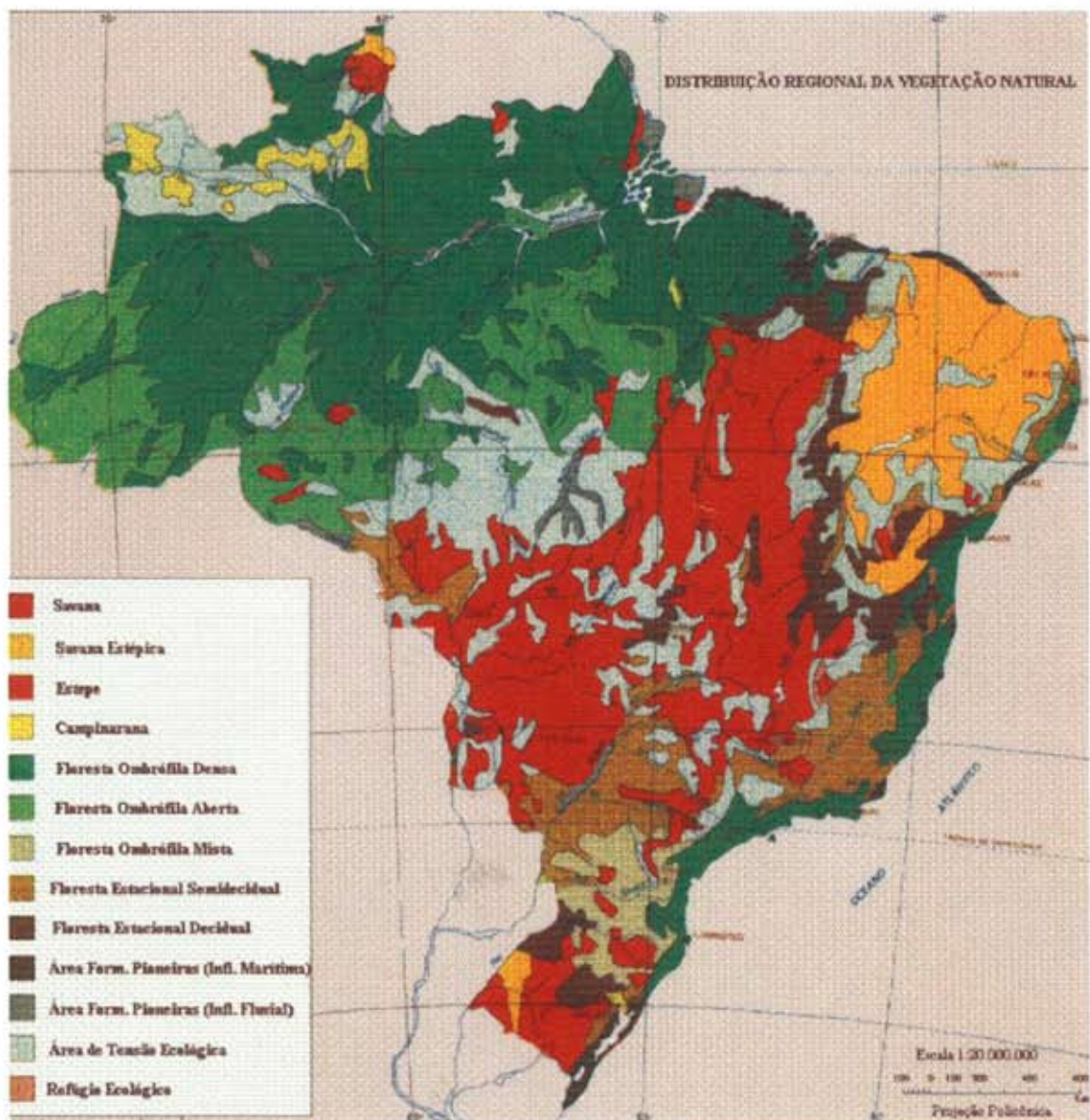


Fig. 3.3 - Mapa de vegetação, escala 1:5.000.000.

FONTE: IBGE e IBDF (1994).

- c) Um conjunto de 108 imagens NDVI derivadas do NOAA-AVHRR GAC (Figura 3.4) , correspondentes ao período de janeiro de 1982 a dezembro de 1990, geradas pelo grupo “Global Inventory Monitoring and Modeling Studies” (GIMMS) - NASA “Goddard Space Flight Center” (GSFC).

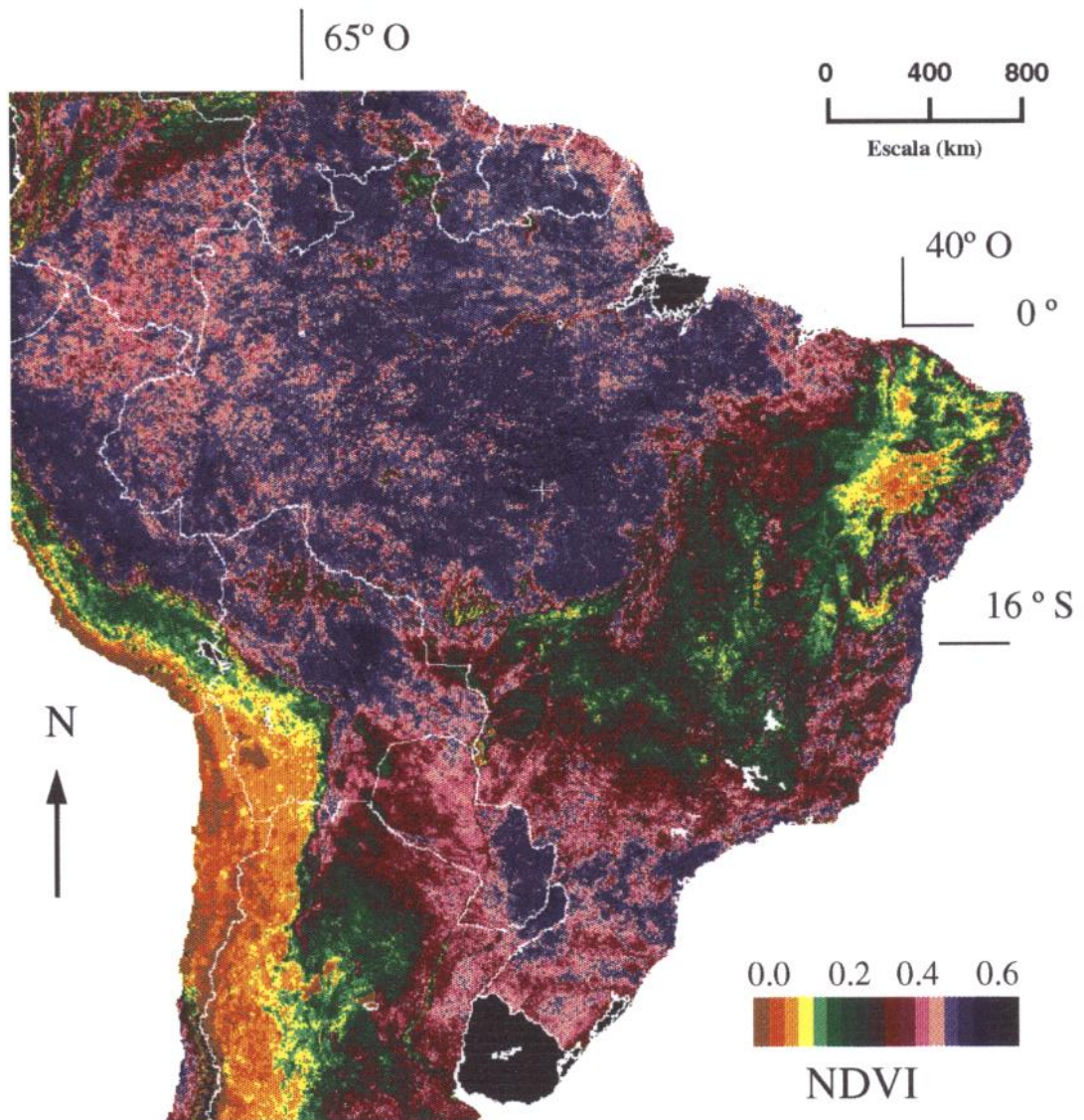


Fig. 3.4 - Imagem NDVI (agosto/82).

Segundo Los et al. (1994), o dado proveniente da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) é reorganizado por continente e as informações referentes aos oceanos são omitidas. Num próximo passo são eliminados dados que são afetados por contaminação de nuvens, espalhamento e absorção devido à atmosfera e visadas fora do nadir. Os valores digitais dos canais 1 e 2 são convertidos em unidades de reflectância usando a calibração de pré-lançamento do fornecida pela NOAA (a degradação do sensor não é considerada). Então o dado NDVI é calculado utilizando os valores dos canais 1 e 2 em unidades de reflectância. O dado NDVI é mapeado em blocos de 1 a 3 dias para uma projeção estereográfica. A partir de um determinado pixel, o programa de mapeamento calcula sua posição geográfica e o coloca em uma projeção estereográfica. Durante o mapeamento, a resolução é reduzida para permitir visualização da projeção continental em uma tela de 1280x1024 pontos de resolução. A verificação do registro é feita comparando feições na imagem com contornos de continentes e rios, resultando em uma imagem com resolução espacial de aproximadamente 7,6 km x 7,6 km. A imagem diária pode apresentar grandes áreas sem dados devido aos espaços entre as órbitas mapeadas e dados eliminados durante os vários estágios de processamento. O volume de dados que falta é reduzido com a união das imagens diárias em composições onde se utiliza o maior valor do NDVI do pixel no período de um mês. Isto acarreta uma redução dos efeitos atmosféricos de espalhamento e absorção (exceto para a absorção por ozônio), contaminação de nuvens e geometria de visada, porque esses fatores diminuem o valor do NDVI (Holben, 1986). O sucesso deste tipo de técnica depende da frequência de ocorrência de efeitos de cobertura de nuvens, presença de vapor d'água e poeira na atmosfera. Esta técnica é menos eficaz em áreas onde o efeito prevalece durante o período de composição. Como exemplo de regiões onde a cobertura de nuvens é persistente pode-se citar o Golfo de Guiné, África Equatorial e algumas

regiões da Amazônia (Amapá e noroeste da Amazônia) que apresentam valores baixos de NDVI. A técnica de composição tende a selecionar dados medidos na região próxima ao nadir ou levemente à frente da direção de espalhamento, diminuindo erros no NDVI devido à geometria de visada0 . Os efeitos resultantes do ângulo solar zenital, degradação do sensor ou resposta do fundo (solo) não são considerados na composição porque são sistemáticos e dependem da localização e/ou época ano.

Um segundo conjunto de imagens NDVI (Figura 3.5), derivado do conjunto da NASA, foi fornecido pela Universidade de Washington (corrigida para degradação do sensor) e abrangia apenas uma porção da Amazônia, compreendida entre 1°N-14°S e 53°O-69°O e com resolução de 0,0625° (~7 Km). Esse segundo conjunto de imagens estava registrado com um conjunto de 108 imagens precipitação mensais (Figura 3.6) processadas por Greenberg (1996), na Universidade de Washington, a partir da interpolação de dados de precipitação provenientes de estações do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), correspondentes ao período de janeiro de 1982 a dezembro de 1990.

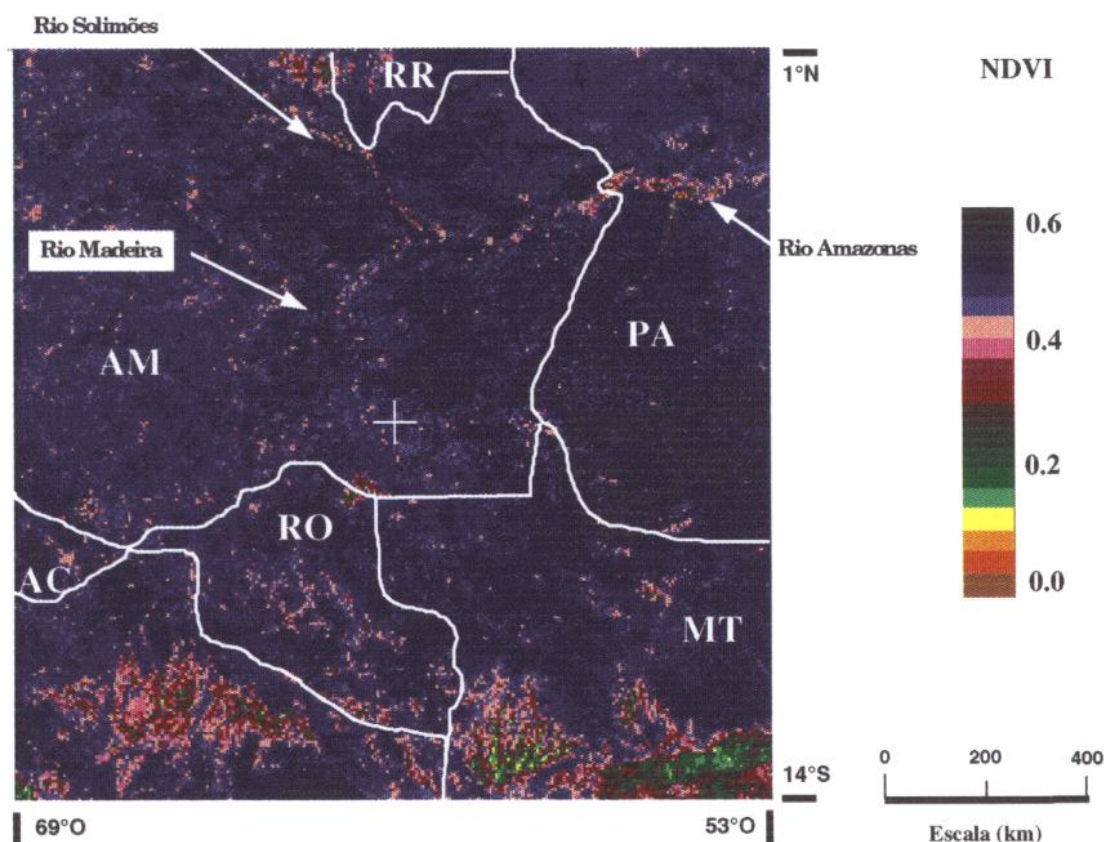


Fig. 3.5 - Imagem NDVI (agosto/82) da região em estudo.

- d) Um conjunto de 108 imagens mensais de precipitação com resolução de $0,0625^\circ$ (~ 7 Km), processadas por Greenberg (1996), Universidade de Washington, correspondentes ao período de janeiro de 1982 a dezembro de 1990 (Figura 3.6);

Segundo Greenberg (1996), as imagens precipitação foram derivadas dos dados primários coletados de 562 estações pluviométricas operadas diariamente pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e mensalmente pelo Peru e pela Bolívia. Esses dados foram inter/extrapolados, utilizando-se um interpolador linear baseado na ponderação da distância para todas as estações dentro de 1° .

Quando não existiam quatro estações dentro desta grade, outras estações além de 1° foram utilizadas para obter pelo menos quatro estações. Topografia e outras informações não foram utilizadas nesta interpolação. Vários métodos de interpolação foram testados, sendo escolhida a interpolação ponderada do inverso da distância (usando-se a função IDW do sistema ARC/INFO). Os dados (gerados em total de milímetros por mês) foram extrapolados para toda a bacia, entretanto não foram confiáveis para os Andes devido a pouca representatividade das estações utilizadas e a grande variação pluviométrica em função da altitude.

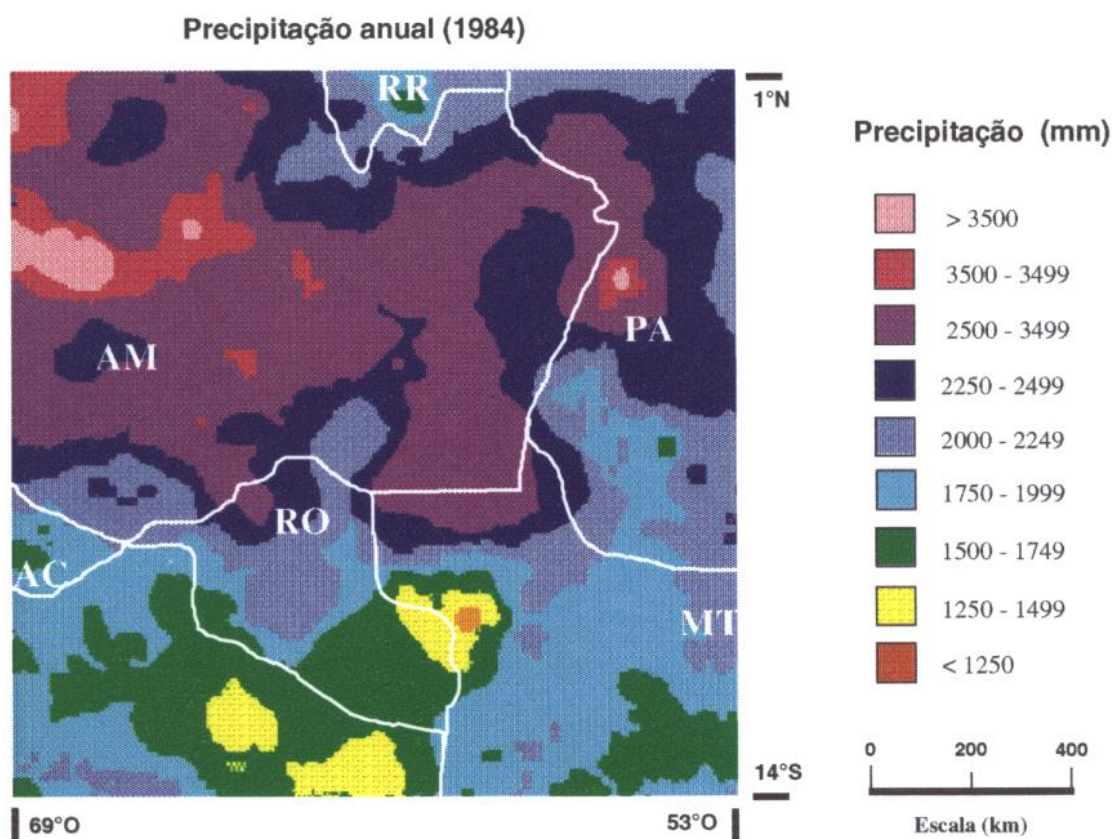


Fig. 3.6 - Imagem precipitação anual interpolada (1984).

FONTE: Greenberg (1996).

- e) Um conjunto de 108 valores (por estação) de precipitação mensais extraídas a partir do banco de dados do DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), correspondentes ao período de janeiro de 1982 a dezembro de 1990;

O DNAEE é o órgão brasileiro responsável por manter um banco de dados hidrológicos para todas bacias hidrográficas brasileiras. Esse banco de dados contém informação sobre precipitação, evaporação, cota dos rios, etc. (DNAEE, 1987). Para consulta a sua base de dados, o DNAEE disponibiliza também o microsistema de dados hidrológicos (MSDHD), que possibilita a formulação de consulta sobre dados climáticos, climáticos e sedimentários usando vários critérios (nome de estação, estado, bacia, rio, localização geográfica, etc.) (DNAEE, 1988).

3.3 MÉTODO

3.3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISE DOS DADOS PONTUAIS

Para analisar dados multitemporais provenientes de fontes diferentes (no caso pixels de uma imagem e dados pontuais de estações meteorológicas) é necessário que um dado pixel da imagem seja referenciado a uma dada localização geográfica (lat./long.) na superfície terrestre. Para isto é necessário determinar os pontos da superfície terrestre a serem analisados e determinar a correspondência deste ponto com um determinado pixel da imagem.

Dentro deste contexto, foi adotado o seguinte procedimento geral para o tratamento desses dados:

- a) Extração dos valores de precipitação do banco de dados do DNAEE;
- b) Extração e manipulação dos dados NDVI das imagens;
- c) Tratamento estatístico multitemporal.

Devido à grande quantidade de informações presentes nesse conjunto multitemporal de imagens, é necessário escolher uma forma conveniente de manipulação dessas informações. Para a análise desses dados foram adotados os seguintes procedimentos:

- a) Utilização dos dados originais do DNAEE para a determinação das coordenadas das estações pluviométricas que possuísem uma quantidade de informações maior que 70%, i.e., estações com informação sobre precipitação mensal em mais de 70% dos meses entre janeiro de 1982 e dezembro de 1990;
- b) Determinação do tipo de cobertura vegetal, onde a estação está inserida, utilizando-se o mapa do IBGE e IBDF (1994);
- c) Cruzamento dessas informações com dados do PRODES (Projeto de Desflorestamento da Amazônia) para a verificação de existência de atividade antrópica. Separou-se as áreas com antropismo para certificar-se da inexistência de mudança na cobertura vegetal original;
- d) Extração do valor do NDVI (média de 3x3 pixels, centrados sobre as coordenadas das estações pluviométricas), referentes às estações meteorológicas utilizadas, da imagem proveniente do NASA/GSFC;
- e) Calibração do valor do NDVI devido à degradação do sensor AVHRR, usando o método proposto por Los (1993);
- f) Análise do sinal do dado NDVI para verificar se o mesmo não estava contaminado por nuvens. Pixels com valores muito baixos indicam presença de nuvens; e

- g) Geração de correlação entre valores do NDVI e de precipitação e extração do coeficiente de correlação (r).

A Figura 3.7 ilustra a sequência dos procedimentos citados acima.

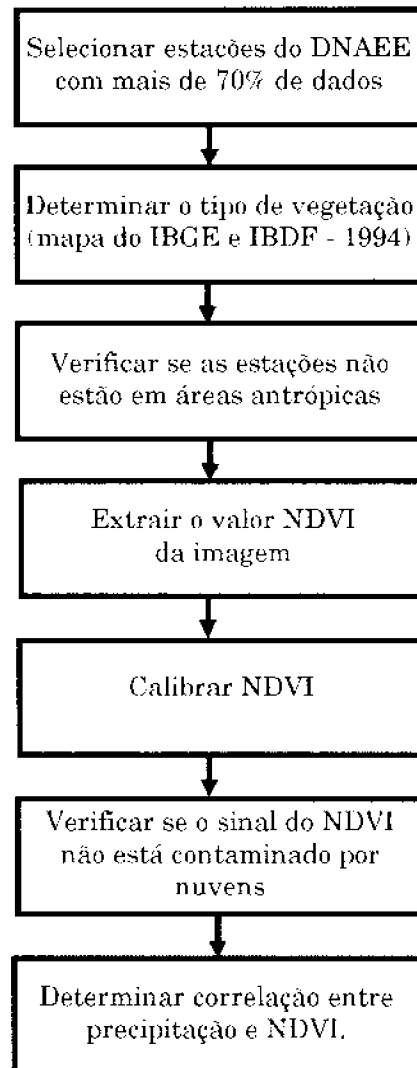


Fig. 3.7 - Diagrama do procedimento de análise pontual dos dados multitemporais.

3.3.1.1 EXTRAÇÃO E MANIPULAÇÃO DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS DO DNAEE

O DNAEE possui um sistema de banco de dados com informações referentes à precipitação diária de diversas bacias hidrográficas. Através deste banco de dados é possível a obtenção de gráficos e/ou arquivos no formato texto desses dados diariamente, mensalmente ou anualmente.

Como o propósito deste trabalho foi analisar a relação entre NDVI e precipitação na floresta amazônica, pesquisaram-se neste banco de dados informações mensais sobre a precipitação das estações previamente definidas. Desta pesquisa gerou-se um arquivo texto contendo informações sobre o nome da estação, suas coordenadas e o valor mensal da precipitação. Este arquivo foi transportado para uma planilha EXCEL onde calculou-se a porcentagem de dados disponíveis. Estes dados foram ordenados de forma decrescente de porcentagem, rejeitando-se as estações com menos de 70% de dados disponíveis.

3.3.1.2 DETERMINAÇÃO DA COBERTURA VEGETAL SOBRE AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Utilizando-se as coordenadas das estações pluviométricas com mais de 70% de dados disponíveis, determinou-se o tipo de vegetação dominante ao redor de cada estação. A área de 3x3 pixels do NDVI foi convertida para a mesma escala do Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE e IBDF, 1994) na escala 1:5.000.000, correspondendo à um quadrado de 4,6 mm. A partir das coordenadas das estações, verificou-se os tipos de vegetação dentro deste quadrado.

3.3.1.3 AVALIAÇÃO DA ANTROPIZAÇÃO NAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais realizou um levantamento da Amazônia Legal (PRODES) para avaliar a extensão da área desflorestada na porção desta região coberta por florestas (INPE, 1992). Consultando a base de dados do PRODES no período de 1978 a 1991, avaliou-se a porcentagem de cobertura vegetal existente ao redor das estações. Cada área analisada correspondia ao tamanho de 3x3 pixels da imagem NDVI, isto é, 519,8 km². A área de 3x3 pixels do NDVI foi convertida para a mesma escala dos dados do PRODES (1:250.000), correspondendo à um quadrado de 91,2 mm. Os “overlays” originais do PRODES foram copiados para um papel milimetrado, onde estava demarcada previamente a área correspondente a dos 3x3 pixels da imagem NDVI, utilizando cartas topográficas como apoio para a determinação das coordenadas da região analisada.

Utilizando-se o sistema SGI (Souza et al., 1990), sistema de informações geográficas desenvolvido pelo DPI/INPE que manipula dados matriciais e vetoriais, digitalizou-se as áreas referentes à floresta, não floresta, desflorestamento e água, e posteriormente calculou-se a porcentagem de cobertura vegetal original remanescente. Foi escolhido um limiar de 50% de cobertura vegetal original para aceitação da estação.

3.3.1.4 EXTRAÇÃO E MANIPULAÇÃO DOS DADOS NDVI DAS IMAGENS

As imagens provenientes do NASA/GSFC estavam originalmente agrupadas em séries anuais em formato EASI/PACE (PCI, 1993). Utilizando-se o sistema EASI/PACE, que é um sistema integrado para sensoriamento remoto, processamento de imagens, visualização de dados e suporte para sistema de informações geográficas, exportou-se as imagens NDVI para formato binário, em arquivos mensais. Este procedimento foi executado utilizando-se o exportador de imagens IMAGEWR do sistema EASI/PACE.

Estas imagens mensais foram concatenadas em um arquivo único de todos os anos e em seguida foi utilizado o sistema IDL, “Interactive Data Language” (Research Systems Inc., 1993a,b), para a extração da média dos 9 pixels ao redor do ponto correspondente à coordenada da estação meteorológica.

Este sistema possui as seguintes características:

- ♦ Possui linguagem estruturada que pode ser usada tanto interativamente como na criação de funções complexas;
- ♦ Os operadores e funções funcionam em matrizes, simplificando análise interativa e reduzindo tempo de programação e;
- ♦ Visualização integrada de gráficos, curvas e imagens que permitem a observação dos resultados imediatamente.

Para a extração dos valores das coordenadas referentes às estações meteorológicas, utilizou-se um programa fornecido pelo

NASA/GSFC (Apêndice A), que dado os valores de linha e coluna de um dado pixel, fornecia a sua coordenada geográfica.

De posse dos valores de linha e coluna referentes aos pontos da imagens, desenvolveu-se um programa (Apêndice B) em IDL, para verificar todos os valores de linha e coluna da imagem, determinar a média dos 3x3 valores de NDVI ao redor do ponto central e gerar um arquivo texto com essas informações.

A Figura 3.8 apresenta o procedimento de processamento dos dados.

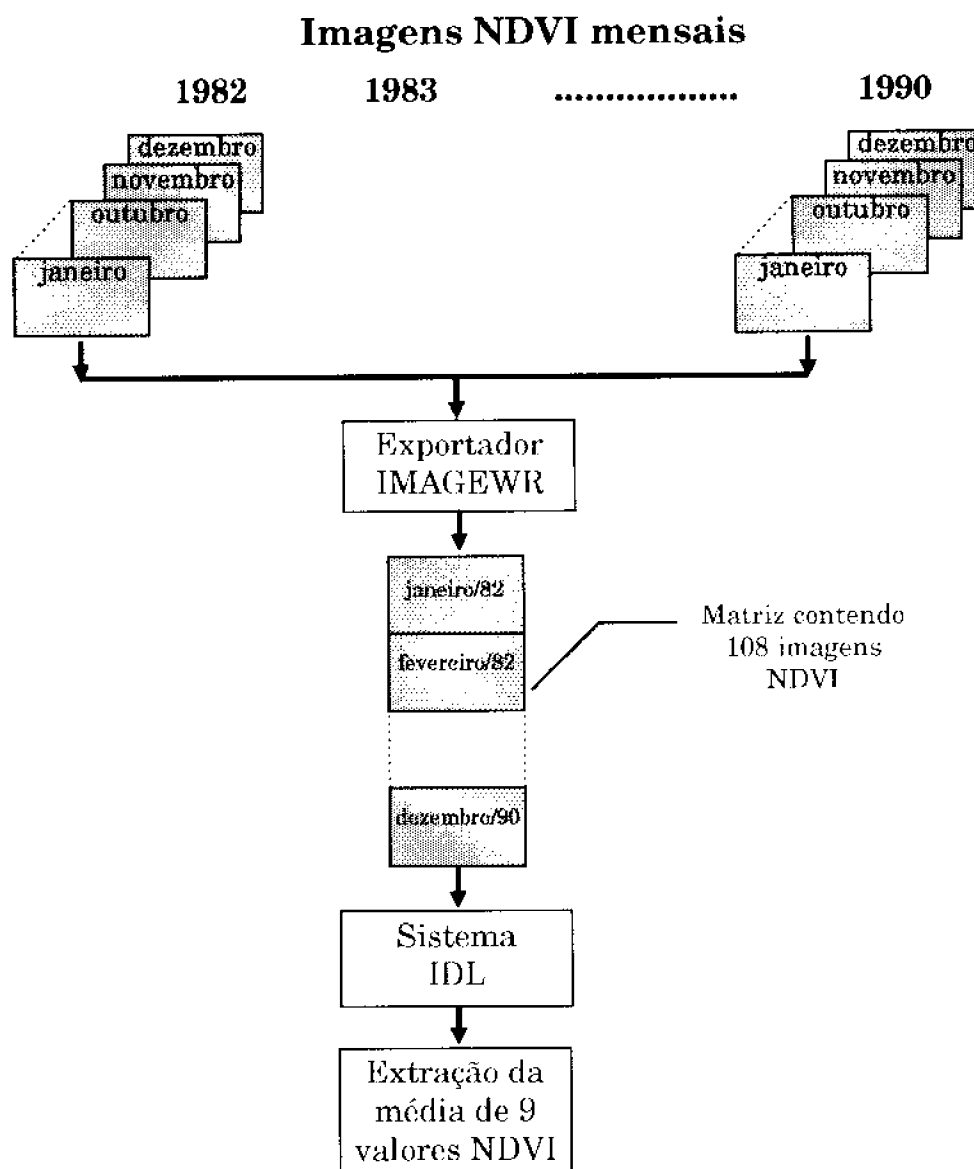


Fig. 3.8 - Diagrama de obtenção do NDVI de uma determinada coordenada da imagem.

3.3.1.5 CALIBRAÇÃO DOS DADOS NDVI DAS IMAGENS

Os dados NDVI foram inicialmente importados para a mesma planilha EXCEL, onde já se encontravam os dados pontuais de precipitação. Posteriormente programou-se a planilha para correção do sinal

do NDVI devido a degradação do sensor, utilizando-se o algoritmo (Apêndice C) proposto por Los (1993).

3.3.1.6 ANÁLISE DO SINAL DO DADO NDVI

Os dados NDVI e de precipitação, referentes à uma dada estação, presentes na planilha foram plotados em um mesmo gráfico, onde o eixo X correspondia aos meses do ano e o eixo Y correspondia aos valores de NDVI e precipitação. Os dados de precipitação foram plotados na forma de barras e os dados do NDVI na forma de linhas, sendo plotado um gráfico para cada estação (Figura 3.9).

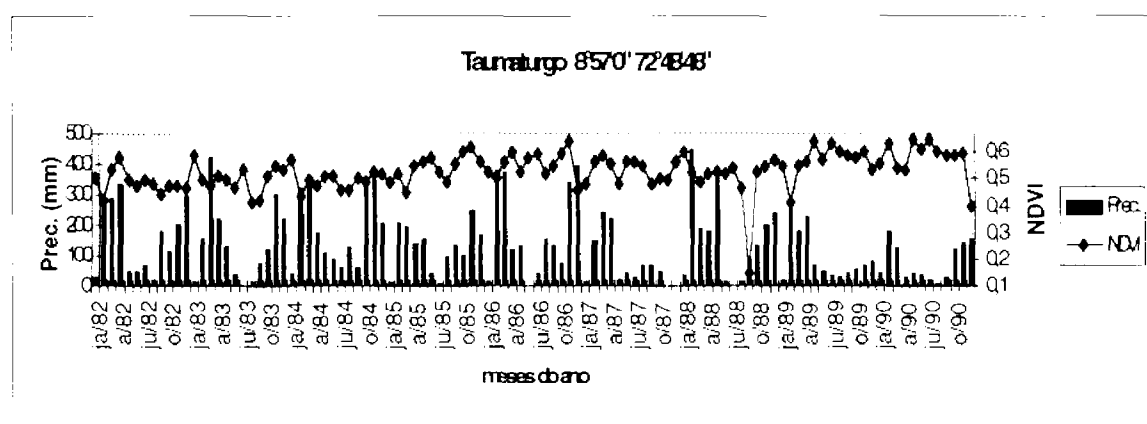


Fig. 3.9 - Distribuição do NDVI e da precipitação para o período de 9 anos.

Com base nesses gráficos, analisou-se o comportamento do sinal do NDVI. Os valores que apresentassem um decaimento de 30% (Figura 3.9) em relação ao valor da sua vizinhança (no tempo), foram rejeitados por estarem contaminados por nuvens ou por aerossóis. Este procedimento foi baseado na hipótese que esse decaimento não era função de mudança do comportamento vegetação e nem da variação mensal da

precipitação, para isto foram analisados os dois vizinhos temporais (à esquerda e à direita).

3.3.1.7 DETERMINAÇÃO DA CORRELAÇÃO

Os valores do NDVI e de precipitação para cada mês foram armazenados na forma de linha (vetores) na planilha. Deslocando-se esses vetores si é possível obter correlações considerando diferenças entre o acontecimento da precipitação e a resposta do NDVI, como mostra a Figura 3.10.

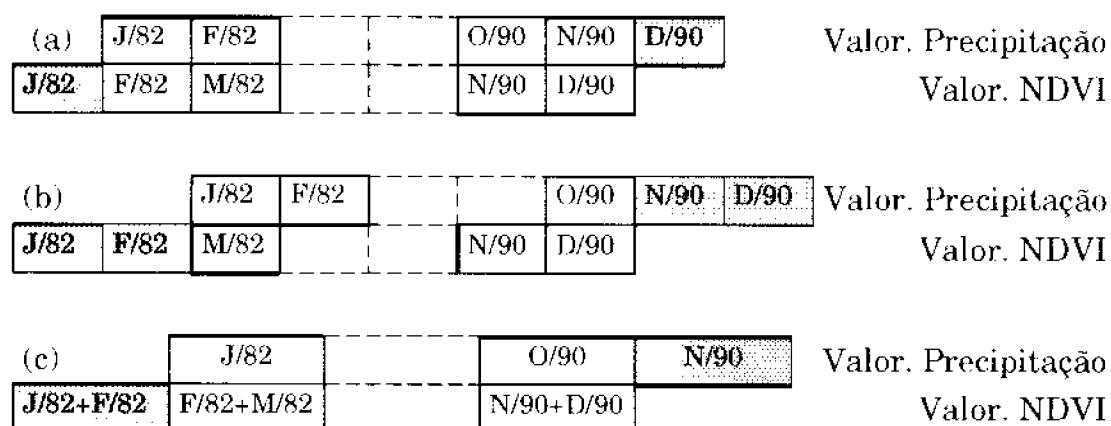


Fig. 3.10 - Diagrama do deslocamento do vetor de precipitação em relação ao vetor de NDVI de: a) um mês; b) dois meses; e (c) a soma de dois meses.

Através do deslocamento do vetor da precipitação foi possível fazer estudos dos valores de coeficiente de correlação das curvas que apresentaram um comportamento linear e logarítmica do NDVI em relação à precipitação no tempo. Isto possibilitou variar o tempo de resposta (“lag”) do NDVI em relação à precipitação, i.e., o tempo entre a ocorrência da precipitação e a resposta do NDVI. Os tempos estudados foram de um mês

("lag"=1), dois meses ("lag"=2) e a soma dos dois meses ("lag"=1+2), usando janela de NDVI de 3x3 pixels (Figuras 3.10a, 3.10b e 3.10c, respectivamente).

3.3.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DOS DADOS MATRICIAIS

Outra forma de analisar a relação entre NDVI e precipitação foi trabalhar com dois conjuntos de imagens: um conjunto de imagens NDVI (corrigidas para efeitos de degradação do sensor) e um conjunto de imagens precipitação (geradas pela Universidade de Washington a partir da interpolação dos dados provenientes do DNAEE). Neste estudo foi gerada uma imagem correlação a partir dos conjuntos de imagens precipitação e NDVI.

Dentro deste contexto, foi adotado o seguinte procedimento geral para o tratamento desses dados:

- a) Conversão de formato EASI/PACE para binário;
- b) Tratamento estatístico multitemporal (Apêndice D);
- c) Geração de histograma da distribuição dos coeficientes de correlação;
- d) Geração de imagem correlação entre NDVI e precipitação.

Os procedimentos adotados durante esta fase estão ilustrados na Figura 3.11.

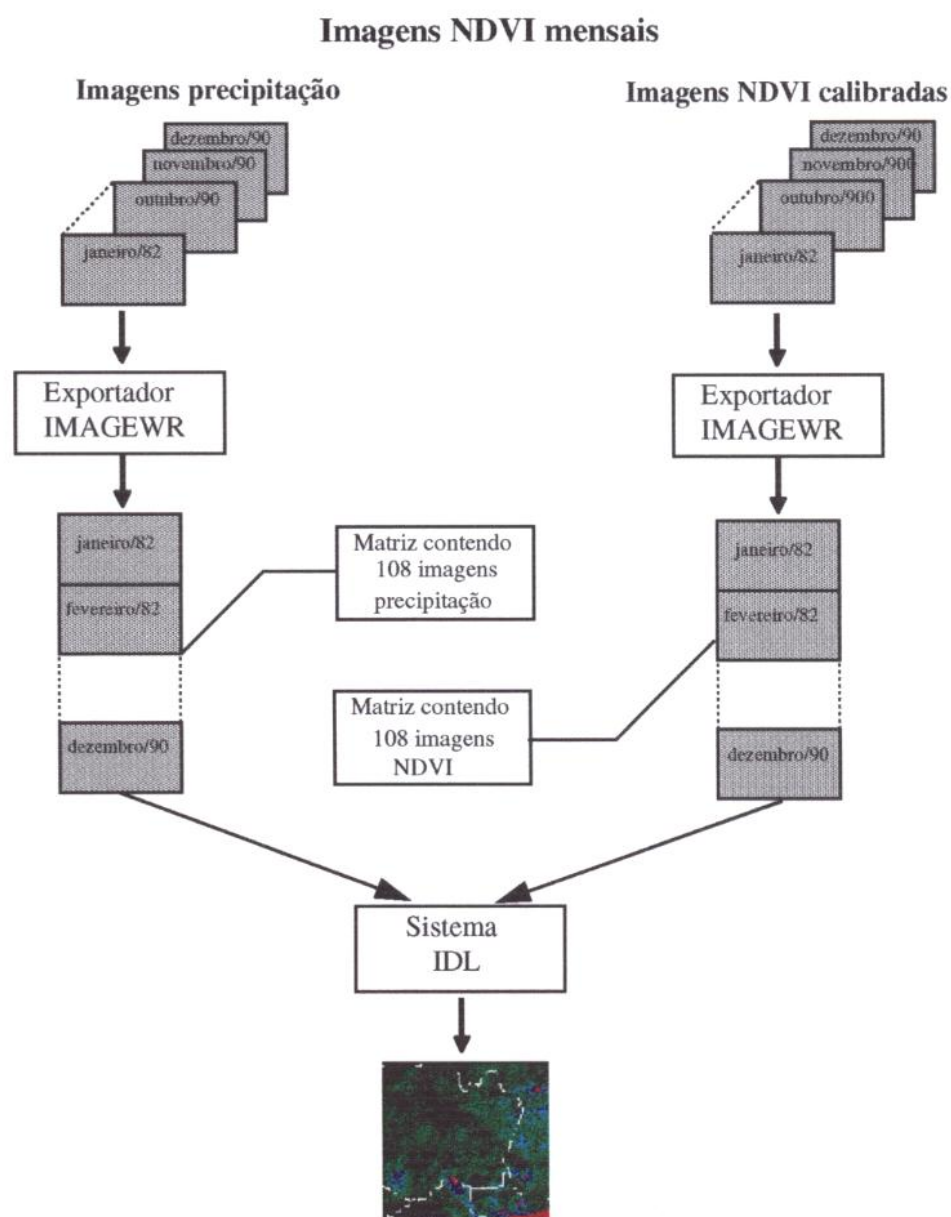


Fig. 3.11 - Diagrama da análise multitemporal da correlação entre imagens NDVI e precipitação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Utilizando-se os dados do DNAEE, verificou-se a existência de 486 estações dentro da área de estudo. No entanto, apenas 160 estações possuíam uma quantidade de informações maior que 70% (Tabela 4.2).

4.2 COBERTURA VEGETAL

A Tabela 4.1 resume os principais tipos de vegetação ao redor das estações pluviométricas, onde nota-se a predominância da floresta ombrófila sobre os demais tipos de vegetação. Após a determinação das estações com mais de 70% de dados disponíveis, montou-se o quadro apresentado na Tabela 4.2, onde estão anotados os tipos de vegetação predominantes ao redor de cada estação meteorológica.

**TABELA 4.1 - NÚMERO DE ESTAÇÕES POR TIPO DE VEGETAÇÃO
PREDOMINANTE**

Tipo de vegetação predominante	Nº de estações
Floresta Ombrófila Aberta (Veg. secundária e atividades agrícolas)	11
Floresta Ombrófila Aberta	31
Floresta Ombrófila Densa (Veg. secundária e atividades agrícolas)	7
Floresta Ombrófila Densa	92
Área de Formações Pioneiras (Veg. c/ influência pluvial ou lacustre)	4
Área de Tensão Ecológica (Floresta Ombrófila- Floresta Estacional)	1
Área de Tensão Ecológica (Campinarana-Floresta Ombrófila)	8
Área de Tensão Ecológica (Savana-Floresta Estacional)	2
Área de Tensão Ecológica (Savana-Floresta Ombrófila)	4
TOTAL	160

4.3 ÁREAS ANTROPIZADAS

Para avaliar a correlação entre o NDVI da vegetação natural e a precipitação, é necessário que não exista alteração significativa da cobertura vegetal original. Utilizando-se os dados do PRODES, digitalizaram-se no SGI as áreas relativas aos 9 pixels NDVI e determinou-se a área com floresta de cada região. A Figura 4.1 apresenta exemplos de algumas dessas áreas, sendo identificadas as áreas desflorestadas em marrom, água em azul, áreas de não-floresta em rosa e áreas de floresta em verde.

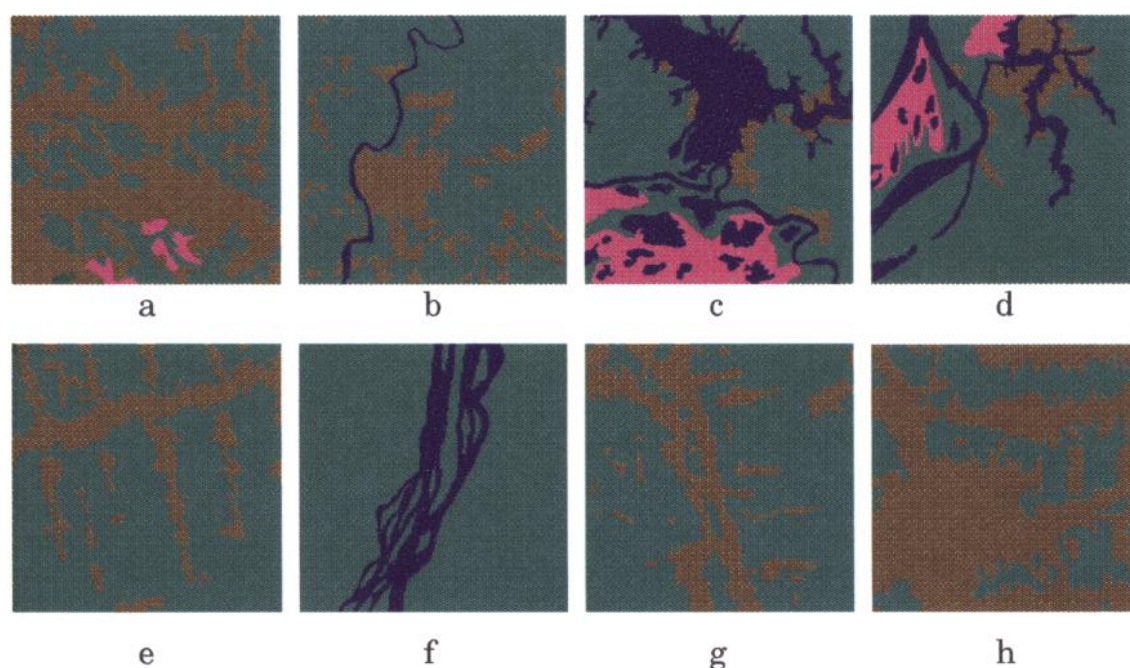


Fig. 4.1 - Exemplo de regiões ao redor de algumas estações pluviométricas:
 (a)Arapari; (b)Humboldt; (c)Badajos; (d)Beruri; (e)Cupari;
 (f)Monte Alegre; (g)Santo Antônio BR-364; e (h)Fazenda Rio Branco.

Verificou-se que 137 estações encontravam-se em áreas com cobertura vegetal original maior que 50%. As outras estações foram separadas, pois haviam sido antropizadas e, portanto, não corresponderiam

mais às áreas com cobertura vegetal original demarcadas no mapa 1:5.000.000 do IBGE e IBDF (1994). Estas áreas, por estarem bastante degradadas, poderiam comprometer a interpretação da análise da correlação para cada tipo de vegetação. A relação da porcentagem de floresta presente ao redor de cada estação é apresentada na Tabela 4.2.

4.4 NDVI CONTAMINADO POR NUVENS E AEROSSÓIS

Dependendo do tipo de vegetação, a resposta do NDVI apresenta uma variação ao longo do tempo. Batista et al. (1997), analisaram a variação temporal do NDVI em várias coberturas vegetais que ocorrem na Amazônia Legal. Neste trabalho os autores demonstraram que a variação do NDVI para as áreas de cerrados é maior que para as áreas de floresta.

Foi analisado o sinal do NDVI relativo às coordenadas das estações que não foram eliminadas nos passos anteriores. Os valores de NDVI que apresentavam uma diminuição de 30% em relação aos valores encontrados na vizinhança (no tempo) foram eliminados. Desta maneira, apenas foram analisados os valores de NDVI que refletissem uma provável mudança das características da vegetação, eliminando-se os valores que pudessem conter resíduos de nuvens ou aerossóis, que poderiam estar contribuindo com a diminuição do valor do NDVI.

4.5 CORRELAÇÃO

A Tabela 4.2 é apresentada como resultado final do processamento dos dados pontuais, que classifica as estações pluviométricas da região Amazônica por tipo de vegetação, quantidade de dados pluviométricos (%), quantidade de floresta na estação (%) e os valores de coeficiente de correlação (curvas NDVI x precipitação com comportamento

linear) para tempos de resposta de 1, 2 e 1+2 meses. Os valores de coeficientes de correlação das curvas NDVI x precipitação que apresentaram um comportamento logarítmico não foram inseridos nesta tabela pois eram iguais ou menores que os valores de coeficientes de correlação das curvas NDVI x precipitação que apresentaram um comportamento linear.

**TABELA 4.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS
POR: TIPO DE VEGETAÇÃO DOMINANTE, % DE DADOS
PLUVIOMÉTRICOS DISPONÍVEIS, % DE COBERTURA VEGETAL
ORIGINAL E COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO**

A - FLORESTA OMBRÓFILA ABERTA (Vegetação secundária e atividades agrícolas)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Alta Floresta	9°45'0" S	56°15'15" O	76,9	61,9	0,34	0,38	0,44
Arapari	1°45'0" S	54°25'25" O	87,4	49,8	,39	0,42	0,50
Ariquemes	9°57'0" S	63°3'3" O	73,4	36,1	0,20	0,27	0,29
Belterra 82246	2°38'0" S	54°57'57" O	90,2	49,6	0,43	0,41	0,48
Colider	10°48'0" S	55°25'25" O	72,7	11,6	0,14	0,37	0,31
Cruzeiro do Sul	7°38'0" S	72°40'40" O	73,4	50,4	-0,01	0,16	0,09
Fazenda Rio Branco	9°53'0" S	63°0'0" O	71,3	37,8	0,11	0,05	0,10
Monte Alegre 82181	2°1'0" S	54°5'5" O	95,8	7,9	0,35	0,32	0,38
Óbidos 82178	1°55'0" S	55°33'33" O	94,4	18,0	0,29	0,40	0,39
Rio Branco 82915	9°58'0" S	67°48'48" O	83,9	3,3	0,31	0,38	0,42
Santarém	2°26'0" S	54°42'42" O	88,1	8,9	0,27	0,20	0,26

(continua)

Tabela 4.2 - Continuação

A6 - FLORESTA OMBRÓFILA ABERTA DE TERRAS BAIXAS							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Envira	7°19'0" S	70°15'15" O	99,3	99,8	-0,08	-0,10	-0,10
Fazenda Califórnia	9°8'0" S	70°49'49" O	78,3	98,4	0,14	0,05	0,09
Fazenda São Luiz	9°47'0" S	66°30'30" O	97,9	82,15	0,11	0,13	0,14
Foz do Breu	9°25'0" S	72°42'42" O	77,6	99,8	0,18	0,22	0,24
Foz do Jordão	9°26'0" S	71°53'53" O	74,8	100,0	0,01	0,08	0,06
Ipixuna	7°30" S	71°41'41" O	86,7	95,1	0,16	0,09	0,12
Itaituba	5°47'0" S	63°21'21" O	76,9	67,5	-0,03	0,05	0,02
Palmeiras do Javari	5°8'0" S	72°48'48" O	75,5	48,9	0,12	0,23	0,22
Rest. Porteira do Amazonas	9°26'0" S	67°17'17" O	88,8	88,6	0,03	0,01	0,03
Seringal da Caridade	9°2'0" S	68°34'34" O	97,2	99,9	0,17	0,17	0,20
Seringal Guarany	9°21'0" S	69°25'25" O	75,5	100,0	0,06	0,18	0,14

A5 - FLORESTA OMBRÓFILA ABERTA SUBMONTANA							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Abuna	9°42'0" S	65°21'21" O	97,9	89,0	-0,02	0,04	0,01
Barra do São Manuel	7°19'0" S	58°55" O	77,6	83,4	0,01	0,16	0,10
Belo Horizonte	5°23'0" S	52°54'54" O	88,1	92,1	0,17	0,25	0,24
Boa Esperança (Faz. do Ometo)	6°47'0" S	51°43'43" O	85,3	64,2	0,25	0,25	0,30
Fazenda Castanhal	10°37'0" S	61°10'10" O	71,3	87,6	-0,08	0,25	0,11
Indeco	10°8'0" S	55°31'31" O	84,6	74,0	0,27	0,25	0,32
Itaituba 82445	4°6'0" S	55°59'59" O	96,5	46,7	0,30	0,26	0,32
Kararaó	3°55'0" S	52°53'53" O	76,2	87,5	0,35	0,34	0,37
Km 1385 BR-163	4°40'0" S	55°48'48" O	94,4	93,2	0,04	0,28	0,19
Km 947 da BR-163	8°30" S	55°11'11" O	83,9	82,4	0,04	0,23	0,16
Mineração Jacundá	9°11'0" S	62°57'57" O	95,8	95,0	-0,05	0,00	-0,03
Monte Alegre	4°39'0" S	52°45'45" O	86,0	85,0	0,27	0,36	0,31
Palmeiral	9°32'0" S	64°48'48" O	91,6	90,9	-0,01	0,16	0,09
Praia	4°49'0" S	54°40'40" O	82,5	93,2	0,31	0,33	0,37
Primavera	6°30" S	52°32'32" O	91,6	87,3	0,11	0,30	0,23
Santo Antônio BR-364	9°15'0" S	63°10'10" O	97,2	75,6	-0,05	0,01	-0,03
Setor Cachoeira	9°27'0" S	63°55" O	77,6	79,5	0,08	0,17	0,15
Tabajara	8°55'0" S	62°6'6" O	75,5	80,9	0,01	0,25	0,16
Trivelato	10°4'0" S	57°44" O	72,0	97,5	0,17	0,32	0,29
Vila do Apuí	7°12'0" S	59°54'54" O	82,5	77,4	0,01	0,23	0,14

D - FLORESTA OMBRÓFILA DENSA (Vegetação secundária e atividades agrícolas)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Breves 82188	1°40'0" S	50°29'29" O	71,3	76,9	0,02	0,34	0,20
Chupari	4°15'0" S	55°29'29" O	89,5	77,3	0,16	0,22	0,22
Fazenda Estrela do Norte	3°54'0" S	50°28'28" O	92,3	57,4	0,35	0,41	0,42
Granja Gazela	3°26'0" S	51°14'14" O	75,5	68,7	0,23	0,42	0,29
São Francisco (Sto. Ant. da Cach.)	0°36'0" S	52°33'33" O	98,6	63,8	-0,03	0,05	0,01
Sítio São Pedro	3°53'0" S	54°23'23" O	71,3	68,1	0,33	0,36	0,39
Uruara	3°41'0" S	53°33'33" O	84,6	65,5	0,33	0,30	0,36

(continua)

Tabela 4.2 - Continuação

Da - FLORESTA OMBRÓFILA DENSE ALUVIAL								
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)			
					1	2	1+2	
Acanauti	1°48'0"	66°33'33" O	83,9	86,0	0,00	0,03	0,01	
Areias	1°13'0" S	51°15'15" O	87,4	84,9	-0,10	0,17	0,04	
Bacabá	6°20'0" S	64°54'54" O	91,6	94,5	0,20	0,24	0,26	
Barreira Alta	4°14'0" S	67°54'54" O	92,3	94,4	-0,08	0,03	0,01	
Barreirinha	2°48'0" S	57°33" O	86,7	20,5	0,25	0,35	0,32	
Barro Alto	3°53'0" S	63°46'46" O	90,2	68,6	-0,22	-0,20	-0,24	
Bou União	2°52'0" S	68°48'48" O	85,3	91,5	0,01	0,07	0,05	
Boca do Acre (Floriano Peixoto)	8°44'0" S	67°23'23" O	97,9	76,8	0,22	0,32	0,32	
Cachoeira	7°42'0" S	65°59'59" O	98,6	91,6	-0,05	0,16	0,06	
Canutama	6°32'0" S	64°19'19" O	99,3	91,2	-0,04	0,13	0,06	
Colocação Coxias	5°24'0" S	69°00" O	72,0	100,0	0,16	0,28	0,25	
Pazenda Paranacre	7°43'0" S	71°25'25" O	95,8	92,9	0,08	0,10	0,11	
Pazenda Sheffer	8°21'0" S	65°42'42" O	84,6	100,0	0,12	0,17	0,18	
Peijó	8°9'0" S	70°21'21" O	91,6	72,7	0,02	0,18	0,10	
Forte das Graças	3°37'0" S	66°6'6" O	99,3	100,0	-0,01	0,06	0,03	
Foz do Gregório	6°48'0" S	70°39'39" O	81,1	85,9	-0,04	0,12	0,05	
Gavião	4°50'0" S	66°45'45" O	89,5	91,3	0,05	0,15	0,12	
Humaitá	7°30'0" S	63°11" O	85,3	56,8	0,00	0,14	0,08	
Ipiranga Velho	2°59'0" S	69°35'35" O	70,6	92,7	0,08	0,08	0,10	
Manicoré 82533	5°49'0" S	61°18'18" O	76,9	73,5	-0,10	0,28	0,07	
Manoel Urbano	8°52'0" S	69°16'16" O	78,3	93,2	0,03	0,05	0,05	
Navio	0°25'0" S	51°28'28" O	88,1	64,5	-0,01	0,10	0,05	
Nhamundá	2°13'0" S	56°42'42" O	86,7	19,9	0,02	0,16	0,10	
Novo Aripuana	5°7'0" S	60°23'23" O	95,8	76,2	-0,08	0,13	0,02	
Oeiras do Para	1°58'0" S	49°52'52" O	88,1	74,3	0,10	0,25	0,20	
Parintins 82240	2°38'0" S	56°44'44" O	99,3	4,7	0,13	0,24	0,21	
Paumí	7°43'0" S	67°55" O	75,5	99,4	0,00	0,20	0,11	
Porto Antunes	2°55'0" S	67°8'8" O	73,4	88,3	0,04	0,08	0,08	
Porto Valler	8°16'0" S	72°44'44" O	85,3	97,2	-0,01	0,16	0,09	
Santa Maria	4°41'0" S	71°28'28" O	76,9	100,0	-0,16	0,05	-0,07	
Santa Maria do Boaçu	0°27'0" S	61°48'48" O	96,5	92,2	0,02	-0,03	-0,01	
Santa Rita do Weill	3°34'0" S	69°22'22" O	85,3	78,8	0,21	0,21	0,24	
Santos Dumont	6°30'0" S	68°30'30" O	97,2	98,6	0,08	0,08	0,09	
Sao Bento	7°33'0" S	65°21'21" O	84,6	93,2	-0,09	0,04	-0,03	
Sao Paulo de Olivença	3°27'0" S	68°48'48" O	97,9	85,9	0,09	0,13	0,12	
Sao Pedro	2°21'0" S	65°7'7" O	78,3	86,4	0,04	-0,14	-0,06	
São Rafael	6°11'0" S	61°49'49" O	97,9	66,9	-0,11	0,02	-0,05	
Seringal Boa Fé	7°15'0" S	72°20'20" O	86,7	99,3	-0,08	0,01	-0,04	
Seringal do Ituí	4°44'0" S	70°18'18" O	74,1	99,9	-0,09	0,06	-0,01	
Serra do Moa	7°27'0" S	73°40'40" O	93,7	96,8	0,05	0,06	0,06	
Soledade	6°37'0" S	69°8'8" O	79,7	98,8	0,03	0,19	0,13	
Taumaturgo	8°57'0" S	72°48'48" O	97,9	98,3	0,00	0,00	0,00	
Vila São Benedito	2°6'0" S	50°23'23" O	88,1	89,5	0,13	0,32	0,25	
Xibauá	5°53'0" S	67°52'52" O	99,3	94,1	0,00	0,03	0,02	

(continua)

Tabela 4.2 - Continuação

Db - FLORESTA OMBRÓFILA DENSE DE TERRAS BAIXAS							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Acampamento IBDF	1°48'0" S	51°28'28" O	99,3	84,9	0,13	0,16	0,17
Badajos	3°25'0" S	62°40'40" O	75,5	53,3	-0,03	0,05	-0,01
Balsa do Rio Urubu	3°1'0" S	58°59'59" O	99,3	89,5	0,12	0,30	0,24
Barragem Curuçá-Una	2°47'0" S	54°16'16" O	98,6	74,6	0,15	0,19	0,18
Benjamin Constant 82410	4°23'0" S	70°2'2" O	92,3	74,2	-0,01	-0,09	-0,07
Beruri	3°54'0" S	61°22'22" O	99,3	71,1	-0,07	0,01	-0,06
Borba	4°24'0" S	59°36'36" O	88,1	82,4	0,00	0,21	0,12
Carao	2°55'0" S	60°40'40" O	86,0	47,7	0,04	0,01	0,03
Carvoeiro	1°25'0" S	62°1'1" O	97,2	61,2	0,17	0,14	0,21
Castanho	4°51'0" S	58°21'21" O	76,2	97,5	0,08	0,09	0,10
Cipóal	2°47'0" S	50°24'24" O	99,3	87,9	0,09	0,15	0,13
Estirão da Santa Cruz	4°18'0" S	65°12'12" O	72,7	96,5	0,02	0,17	0,14
Fazenda Boa Esperança	5°14'0" S	66°35'35" O	81,1	100,0	-0,09	0,14	0,03
Fazenda Bonsucesso	7°54'0" S	61°11'11" O	88,1	94,1	-0,09	0,19	0,06
Goiano	7°51'0" S	62°16'16" O	72,0	95,6	-0,03	0,16	0,07
Jutai	4°40'0" S	68°55'55" O	86,7	100,0	0,02	0,12	0,09
Manacapuru	3°19'0" S	60°35'35" O	76,2	26,4	0,31	0,27	0,35
Manaus 82336	3°8'0" S	60°1'1" O	86,0	11,6	0,01	0,04	0,03
Maracá	1°49'0" S	65°21'21" O	98,6	89,5	0,03	-0,08	-0,03
Maracuera Florestal	2°8'0" S	51°9'9" O	98,6	95,6	0,14	0,28	0,24
Maues	3°21'0" S	57°43'43" O	97,2	34,7	0,01	0,21	0,13
Moura	1°30'0" S	61°40'40" O	96,5	73,2	0,07	0,06	0,06
Nova Esperança	6°22'0" S	61°47'47" O	81,8	89,1	0,30	0,35	0,39
Nova Olinda do Norte	3°44'0" S	59°33'3" O	82,5	62,3	0,04	0,14	0,10
Novo Airão	2°37'0" S	60°57'57" O	87,4	53,6	0,03	0,08	0,05
Osório Fonseca	3°45'0" S	58°18'18" O	88,1	83,5	0,06	0,22	0,15
Porto de Moz	1°44'0" S	52°14'14" O	84,6	28,1	0,34	0,38	0,41
Santo Antônio do Ica	3°5'0" S	67°56'56" O	99,3	74,2	0,02	0,08	0,06
Seringal Moreira	5°6'0" S	63°58'58" O	78,3	100,0	-0,10	0,19	0,03
Tabatinga	4°15'0" S	69°56'56" O	81,8	40,9	0,09	0,07	0,09
Urucará	2°32'0" S	57°45'45" O	98,6	20,5	0,14	0,24	0,21
Vera Cruz	3°49'0" S	57°11'11" O	88,1	91,6	0,12	0,22	0,20

Ds - FLORESTA OMBRÓFILA DENSE SUBMONTANA							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Baruri	2°1'0" S	61°32'32" O	86,0	90,7	0,15	0,14	0,16
Boca do Guariba	7°41'0" S	60°18'18" O	99,3	99,6	0,09	0,22	0,19
Bubure (Sai Cinza)	4°38'0" S	56°18'18" O	88,1	84,5	0,28	0,32	0,36
Caracuru	0°8'0" S	52°56'56" O	77,6	95,4	0,17	0,08	0,14
Fazenda Paqueta	0°25'0" S	53°42'42" O	77,6	96,6	0,06	-0,01	0,03
Fazenda Paramazonas	4°38'0" S	57°54'54" O	95,8	97,0	0,16	0,18	0,18
Humboldt	10°10'0" S	59°24'24" O	87,4	79,1	-0,02	0,14	0,07
Jacareacanga	6°14'0" S	57°46'46" O	95,8	77,8	0,01	0,28	0,17
Jatobá	5°9'0" S	56°50'50" O	76,2	82,2	0,21	0,29	0,29
Km 1027 da BR-163	6°50'0" S	55°38'38" O	81,1	96,5	-0,06	0,21	0,09
Km 1326 BR-163	5°10'0" S	55°42'42" O	96,5	100,0	0,20	0,32	0,31
Pancada	0°11'0" S	51°48'48" O	83,9	91,8	0,10	0,21	0,17
Prairinha	7°15'0" S	60°24'24" O	95,8	97,0	-0,09	0,20	0,06
Ruopólis Presidente Médici	4°50'0" S	55°10'10" O	81,8	85,4	0,17	0,24	0,23
Santarém-Sucurundi	6°45'0" S	58°56'56" O	90,2	98,3	-0,05	0,05	0,00
Seringal Jenipapo	6°40'0" S	60°13'13" O	95,8	90,3	-0,06	0,11	0,03

(continua)

Tabela 4.2 - Conclusão

LO - ÁREA DE TENSÃO ECOLÓGICA (Campinarana-Floresta Ombrófila)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Barcelos 82113	0°59'0" S	62°55'55" O	83,9	69,3	0,18	0,18	0,20
Cumaru	0°36'0" S	63°21'21" O	97,9	73,2	0,12	0,15	0,14
Jalanaca	0°0'0" S	62°0'0" O	99,3	66,4	0,08	0,03	0,07
Livramento	0°19'0" S	66°11'11" O	98,6	84,8	-0,03	-0,08	-0,07
Macuru	1°38'0" S	67°40'40" O	91,6	88,5	-0,05	0,05	0,01
Sao Gabriel da Cachoeira 82106	0°8'0" S	67°5'5" O	93,0	82,5	-0,05	-0,03	-0,10
Umanapana	1°53'0" S	62°28'28" O	70,6	85,1	0,16	0,19	0,19
Vila Bitencourt	1°23'0" S	69°25'25" O	86,7	53,4	-0,01	-0,05	-0,03

ON - ÁREA DE TENSÃO ECOLÓGICA (Floresta Ombrófila- Floresta Estacional)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Agropecuária Cajabi	10°50'0" S	54°49'49" O	73,4	83,8	0,19	0,35	0,33

Pa - ÁREA DE FORMAÇÕES PIONEIRAS (Veg. com influência pluvial ou lacustre)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Almeirim	1°32'0" S	52°37'37" O	88,1	19,9	0,21	0,24	0,26
Aruma-Jusante	4°41'0" S	62°7'7" O	72,7	80,4	-0,26	-0,22	-0,29
Itacotiara 82336	3°8'0" S	58°26'26" O	99,3	17,1	0,13	0,27	0,25
Jarilandia	1°8'0" S	51°59'59" O	97,9	55,6	0,12	0,31	0,20

SN - ÁREA DE TENSÃO ECOLÓGICA (Savana-Floresta Estacional)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Fazenda Agrotep	10°37'0" S	57°32'32" O	97,2	92,1	-0,03	0,10	0,04
Santa Rosa	8°55'0" S	57°25'25" O	73,4	94,8	0,17	0,33	0,28

SO - ÁREA DE TENSÃO ECOLÓGICA (Savana-Floresta Ombrófila)							
	Latitude	Longitude	% dados	% floresta	Corr. linear "lag" (mês)		
					1	2	1+2
Boca do Inferno	1°34'0" S	54°49'49" O	90,2	80,7	0,02	0,09	0,06
Fazenda Santa Maria	8°12'0" S	63°43'43" O	82,5	68,5	-0,14	0,03	-0,06
Juruti	2°8'0" S	56°3'3" O	85,3	3,4	0,16	0,24	0,22
Praiaha	1°48'0" S	53°29'29" O	99,3	0,7	0,48	0,38	0,48

FONTE: Organizado por Almeida (1996).

Os valores marcados na Tabela 4.2 correspondem às áreas de floresta inferiores a 50% e aos coeficientes de correlação superiores a 0,3. A partir desta tabela, nota-se a existência de uma correlação baixa entre NDVI e precipitação em todos os pontos analisados. O maior valor de

coeficiente de correlação, em área não antropizada, foi encontrado na estação Alta Floresta ($r=0,44$), enquanto que o maior valor de coeficiente de correlação, em área antropizada, foi encontrado na estação Arapari ($r=0,50$), valores estes muito baixos para afirmar a existência de relação causa-efeito.

Foram encontrados os valores médios anuais do NDVI de 0,49 para a floresta ombrófila densa (C.V.=11,6%), 0,52 para a floresta ombrófila aberta (C.V.=11,4%), 0,47 para as áreas de formações pioneiras (C.V.=11,3%) e os seguintes valores para as áreas de transição ecológica: 0,50 para Campinarana-floresta ombrófila (C.V.=10,6%), 0,54 para floresta ombrófila-floresta estacional (C.V.=12,2%), 0,52 para Savana-floresta estacional (C.V.=12,0%) e 0,49 para Savana-floresta ombrófila (C.V.=10,9%). Observa-se que o NDVI médio das formações vegetais analisadas possuem valores bastante próximos entre si.

O maior e o menor valor de coeficiente de variação foi encontrado onde o valor médio anual de precipitação foi de 327mm (C.V.=42,4%) e 107mm (C.V.=112,2%), respectivamente na estação Boa União e Kararao. Esta diferença de precipitação e coeficiente de variação entre essas estações demonstram que Boa União se encontra em uma região em que não existe estação seca e Kararao se encontra em região que possui estação seca. Também é possível verificar que o coeficiente de correlação entre NDVI e precipitação é maior em Kararao ($r=0,37$) do que em Boa União ($r=0,05$).

Nicholson et al. (1990), analisaram 4 regiões de floresta da África Leste (Kenya e Tanzânia), encontrando valores máximos de NDVI entre 0,50-0,55 e valores máximo de precipitação de 550 mm na estação de Amani. Comparando os resultados de Amani com obtidos no Km 1326 BR-163 (que possui a mesma latitude), a estação da Amazônia possui

aproximadamente os mesmos valores máximos de NDVI e precipitação (Figura 4.2), respectivamente 0,60 e 495,7 mm. No entanto, nota-se um coeficiente de correlação de 0,67 (curva NDVI x precipitação com comportamento linear), reportada para a região de Amani e de 0,30, verificada neste trabalho, para a região do Km 1326 BR-163 (considerando um lag de 1+2 meses). Tal fato pode estar associado à sazonalidade da vegetação na região de Amani e a inexistência de mudanças fenológicas associadas à sazonalidade da região do Km 1326 BR-163.

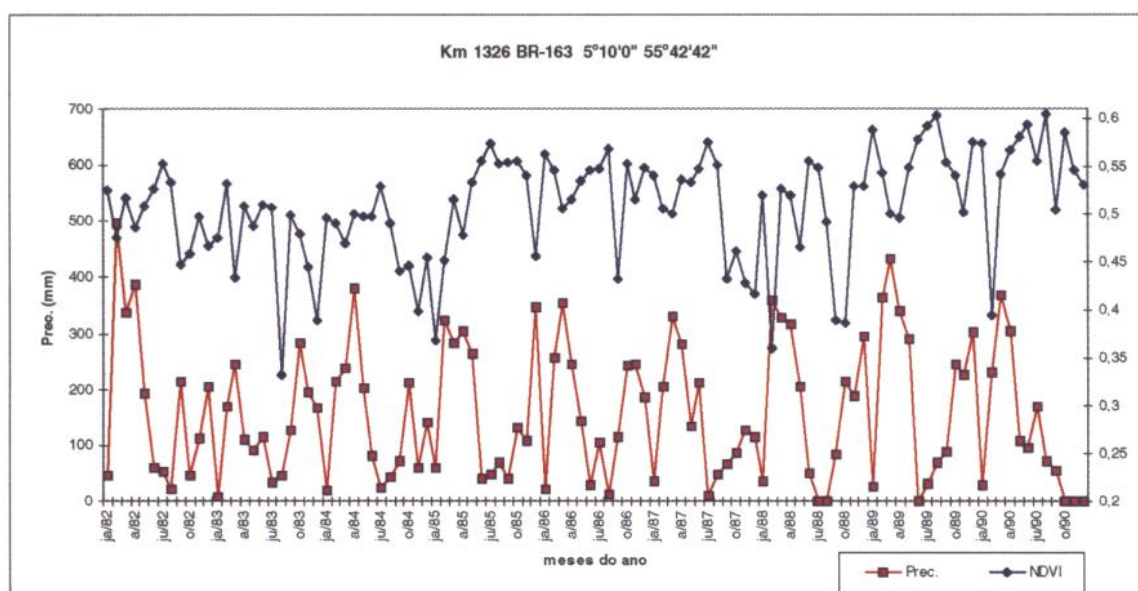


Fig. 4.2 - Variação do NDVI e da precipitação para o período de janeiro/82 a dezembro/90 (floresta ombrófila densa).

Analisando os gráficos da Figura 4.2 e 4.3, nota-se que mesmo após a diminuição da precipitação, o NDVI mantém-se em um patamar elevado por algum tempo. Nicholson e Farrar (1994) demonstraram que para a África a variação do NDVI está mais relacionada com a capacidade de armazenamento de água do solo. Para a Amazônia, também há indícios que o NDVI (quando varia) pode ser em função da umidade do solo e não da precipitação.

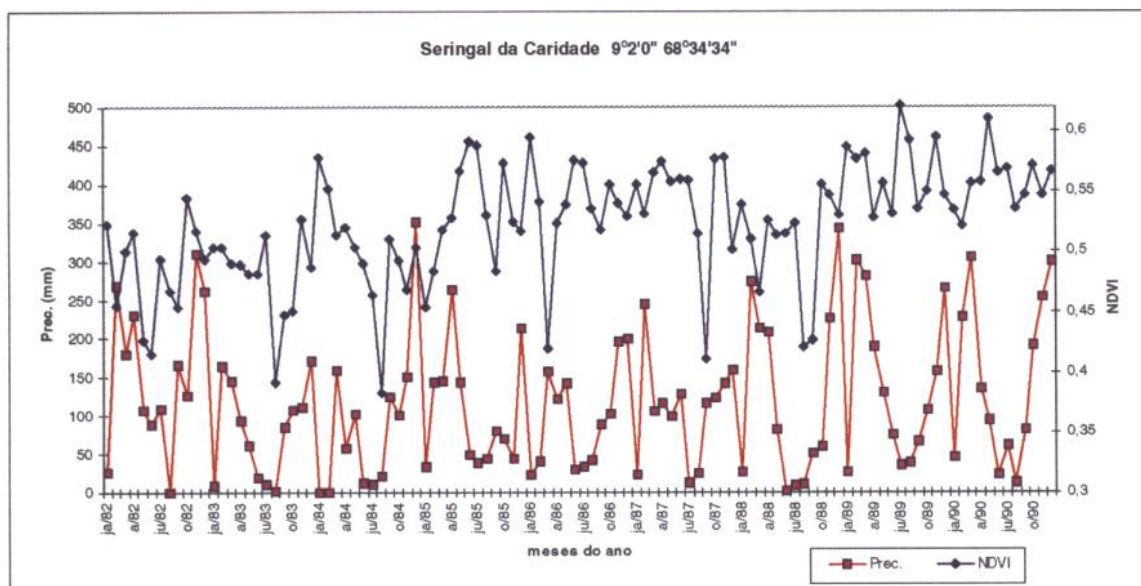


Fig. 4.3 - Variação do NDVI e da precipitação para o período de janeiro/82 a dezembro/90 (floresta ombrófila aberta).

Nicholson e Farrar (1994), concluíram que o NDVI está relacionado linearmente com a precipitação quando a faixa de precipitação mensal está entre 25-200 mm. Após este limite o NDVI aumenta lentamente com o acréscimo de precipitação ou mantém-se constante. Para a Amazônia, muitos valores de precipitação geralmente estão acima deste patamar, o que implica que o NDVI pode estar saturado para qualquer variação da precipitação e a variação do NDVI se deve possivelmente à contaminação de nuvens e fumaça, não eliminadas totalmente nos procedimentos prévios (Figura 4.4).

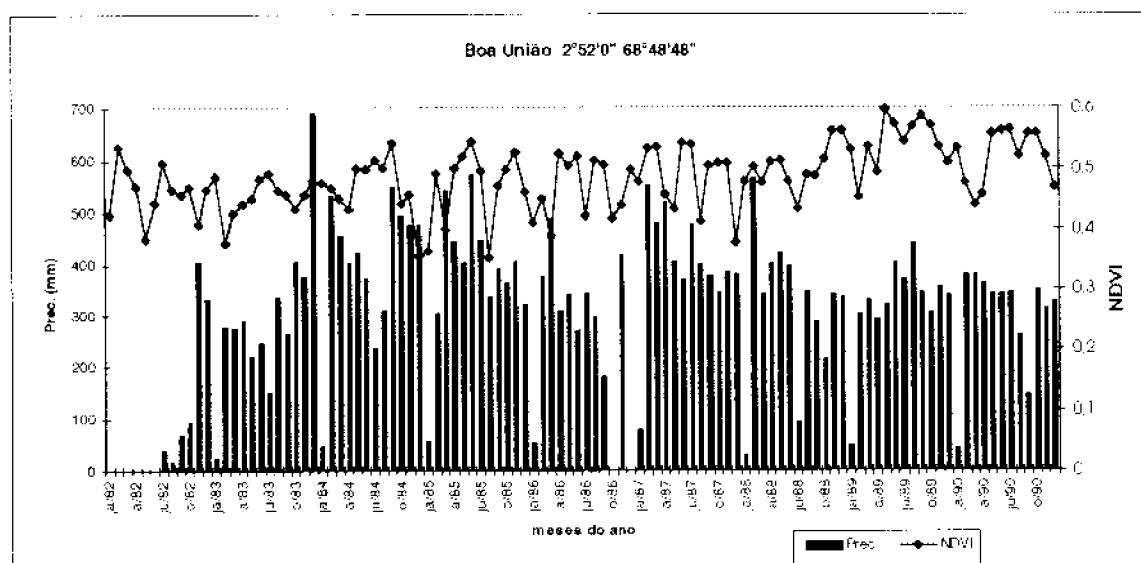


Fig. 4.4 - Variação do NDVI e da precipitação para o período de janeiro/82 a dezembro/90 (área sem estação seca).

Analisando o coeficiente de variação da precipitação é possível verificar que os maiores valores de coeficiente de correlação corresponderam às estações com coeficientes de variação maior que 90% e os menores valores de coeficiente de correlação aos coeficientes de variação menores que 70%. Indicando que as áreas de menor variação de precipitação apresentaram menor correlação com o NDVI. Um exemplo disto é que a maioria das estações com precipitação média superior a 200mm e coeficiente de variação de precipitação menor que 70% apresentaram coeficientes de correlação menores que 0,1. Por outro lado, a maioria das estações com precipitação média inferior a 200mm e coeficiente de variação de precipitação maior que 90% apresentaram coeficientes de correlação maiores que 0,2.

De forma similar aos resultados deste trabalho, Schultz e Halpert (1995) avaliaram a relação entre o NDVI global e imagens de precipitação interpoladas a partir de dados do "Global Telecommunications

System” (GTS) para o período de 1985 a 1992. Os autores encontraram correlações próximas a zero ou negativas na Amazônia, que foram creditadas à abundante precipitação na região.

Analisando as correlações encontradas nas estações em áreas antropizadas, verificou-se que as mesmas possuíam valores de coeficiente de correlação maiores que 0,2, possivelmente devido a resposta da vegetação implantada naquela região à variação de precipitação.

4.6 ANÁLISE DE IMAGENS MULTITEMPORAIS

A partir da análise dos dados matriciais podemos visualizar o histograma da distribuição dos valores de coeficientes de correlação de todos os pixels da imagem da região de estudo, notando que a maioria dos pixels da imagem possui correlação entre 0 e 0,3 (Figura 4.5).

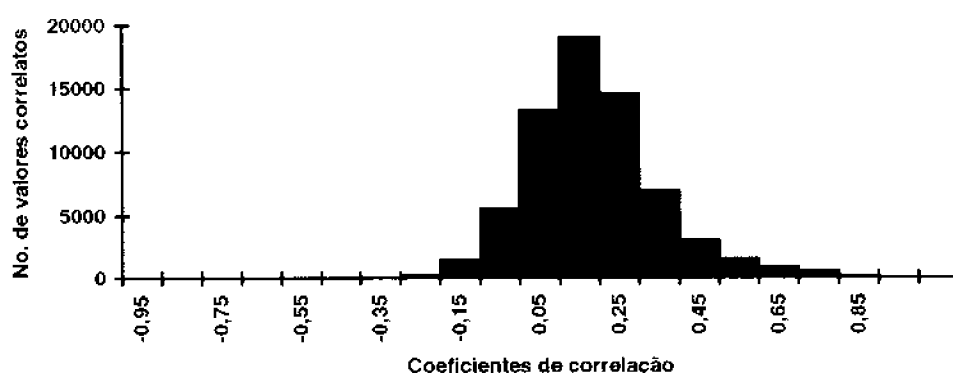


Fig. 4.5 - Histograma dos coeficientes de correlação entre imagens NDVI e precipitação.

Ao mesmo tempo foi gerada uma imagem correlação entre NDVI e precipitação. Comparando os resultados obtidos na análise pontual (estações terrestres) com os obtidos na análise matricial (imagem NDVI x precipitação), pode-se verificar que os resultados são similares. As áreas referentes aos maiores coeficientes de correlação corresponderam às áreas de cerrado ou áreas em que a ação antrópica foi intensa. As áreas referentes às florestas ombrófilas originais (densa e aberta) apresentaram os menores valores de correlação. A Figura 4.6 mostra a imagem correlação com tonalidades correspondentes aos coeficientes de correlação.

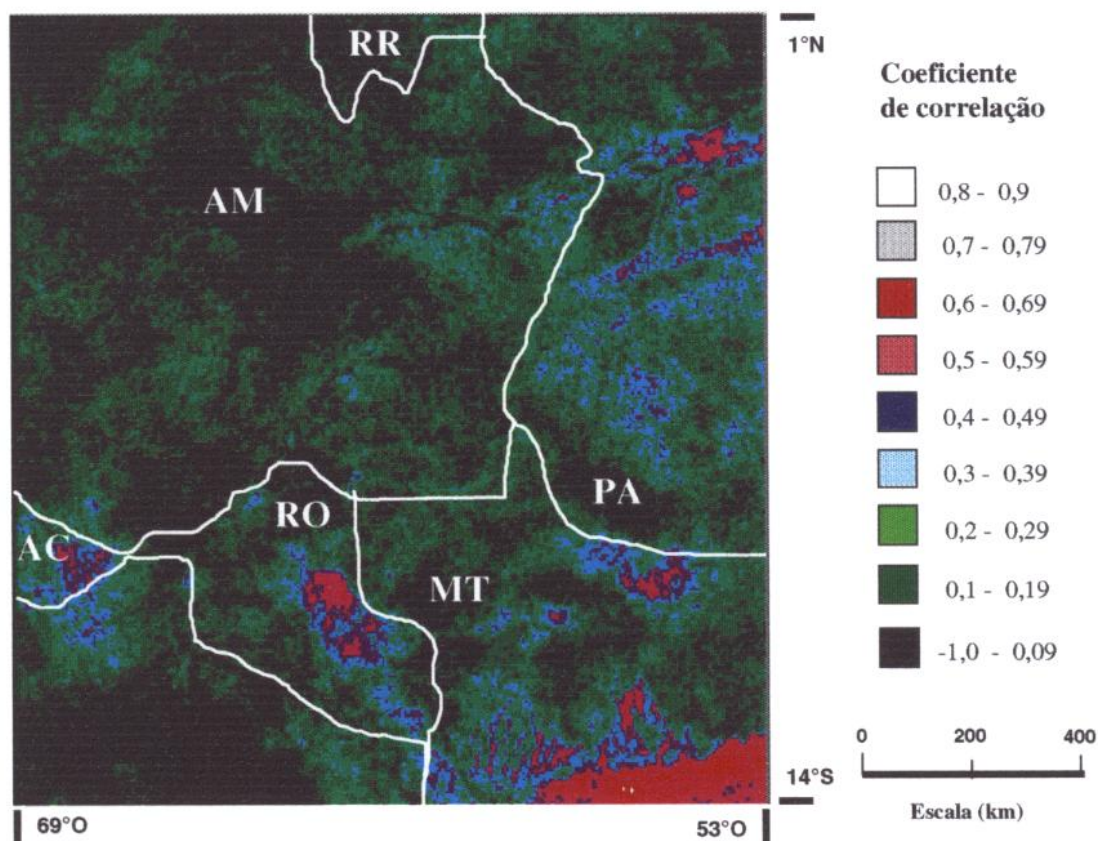


Fig. 4.6 - Imagem Correlação entre NDVI e precipitação (interpolada pela U.W. a partir dos dados do DNAEE).

Neste estudo foi possível verificar uma alta correlação ($r=0,6-0,9$) em áreas de cerrado, uma correlação menor ($r=0,4-0,6$) em áreas antropizadas e valores de correlação próximos a zero em áreas de florestas. A existência de uma correlação maior em áreas antropizadas do que em áreas de floresta pode ser creditada a uma possível resposta da vegetação implantada naquela região à precipitação.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia de análise multitemporal de imagens para avaliação de correlação entre valores de precipitação e índice de vegetação.

Analisando-se os dados de precipitação para o período de janeiro/1982 a dezembro/1990, observou-se que existem 486 estações pluviométricas na região da bacia Amazônia, que fazem parte da rede do DNAEE. No entanto apenas 160 dessas estações possuem um conjunto de informações com mais de 70% de dados mensais disponíveis. Analisando o desflorestamento da região, nota-se também que 137 dessas estações (com um conjunto de dados disponíveis maior que 70%) estão localizadas em regiões com mais de 50% de florestas.

Após a avaliação da correlação, verificou-se através da metodologia adotada a existência de baixa correlação entre NDVI e precipitação em áreas de floresta, tanto proveniente da avaliação na forma pontual (estações terrestres) como na forma de imagens. Em ambos casos foram analisadas os valores de coeficiente de correlação das curvas NDVI x precipitação que apresentaram um comportamento linear e logarítmica, verificando que para a Amazônia não se observa uma diferença grande entre ambas as análises. O que influencia é o tempo de resposta do NDVI à precipitação. O tempo de resposta de 2 meses entre a ocorrência da precipitação e a resposta do NDVI apresentou melhores resultados de correlação na maioria dos casos.

Para a Amazônia, nota-se que as áreas que possuem maior variação anual de precipitação (C.V. > 90%) apresentaram

coeficientes de correlação maiores ($r > 0,2$) que as áreas com menor variação anual de precipitação (C.V. $< 70\%$), cujos coeficientes de correlação foram menores que 0,1.

A alta correlação nas áreas de cerrados ($r > 0,6$), observada na análise temporal das imagens, confirmou estudos realizados por outros autores (Assad et al., 1988; 1996).

Notou-se que o método de análise multitemporal de imagens, gerando como produto uma imagem correlação NDVI x precipitação, pode ser muito útil para avaliação de áreas mais susceptíveis à precipitação, tanto aquelas áreas com predominância de vegetação sazonal (cerrados) quanto aquelas dominadas por vegetação secundária.

Recomenda-se investigar a influência da variação da capacidade de retenção de água dos solos na sazonalidade da vegetação e consequentemente no NDVI, uma vez que observou-se casos onde há uma variação alta na precipitação anual, não relacionada com a variação do NDVI. Nestes casos, a água retida no solo pode estar evitando o estresse hídrico da vegetação durante os meses mais secos.

Devido a saturação do NDVI a partir de índices de área foliar igual a 3.0, recomenda-se investigar a relação entre precipitação e outros índices, e.g., o “Soil Adjusted Vegetation Index” (SAVI), para eventualmente caracterizar melhor a resposta da vegetação amazônica à precipitação.

Para melhor aproveitamento do grande potencial das imagens obtidas pelo AVHRR, que tem alta resolução temporal, recomenda-se estudos que utilizam técnicas de análise em frequência para classificar a cobertura da terra a partir da variação mensal, sazonal ou anual das imagens NDVI.

Finalmente, para melhorar o entendimento do impacto da variação da precipitação na vegetação amazônica, recomenda-se a integração dos dados de índice de vegetação, solos, vegetação, clima, etc. em um sistema de informações geográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, D.S.; Meira Filho, L.G.; D'Alge, J.C.L.; Mello, E.K.; Moreira, J.C.; Medeiros, J.S. The Amazonia Information System. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, 1992. **Archives**. Washington, 1992, v.28, p. 259-266.
- Assad, E.D.; Setzer, A.; Moreira, L. Estimativa de precipitação através dos índices de vegetação do satélite NOAA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5. Natal, RN, Outubro 11-15, 1988. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1988, v.2, p.425-429.
- Assad, E.D.; Castro, L.H.R.; Almeida, S.A.O. Análise exploratória da variação espaço temporal do índice de vegetação NOAA/AVHRR e pluviometria: caso dos cerrados brasileiros. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9. Salvador, BA, Outubro 11-15, 1996. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1996. 1 CD-ROM
- Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. Washington, D.C., John Wiley & Sons, Inc., 1989, 734 p.
- Baret, F.; Guyot, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, (35):161-173, 1991
- Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E.; Lawrence, W. T. Monitoramento da cobertura florestal através de índices de vegetação do NOAA-AVHRR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. Curitiba, Maio 10-14, 1993. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1993, v.2, p.30-37.
- Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E.; Lawrence, W. T. Long-term monitoring of Amazon vegetation cover using NOAA-AVHRR data. Aceito para publicação no **International Journal of Remote Sensing**, 1997.

- Brasil. Lei nº 5.173 de 27 de outubro de 1966. Dispõe sobre plano de valorização da Amazônia. **Diário oficial**, Brasília, 27 out. 1966, p. 1512-1513.
- Brasil. Lei complementar nº 31 de 11 de outubro de 1977. Cria o Estado do Mato Grosso do Sul e dá outras providências. **Diário oficial**, Brasília, 11 out. 1977, p. 5.
- Brasil. Atos das disposições constitucionais transitórias. **Constituição: República Federativa do Brasil**. Brasília, 1988, p. 168-169.
- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). **Inventário das estações fluviométricas**. Brasília, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Divisão de Controle de Recursos Hídricos, 1987.
- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). **Microsistema de dados hidrológicos**. Brasília, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Divisão de Controle de Recursos Hídricos, 1988.
- Figuerola, S.N.; Nobre, C.A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. **Climanálise**, 5(6):36-45, 1990.
- Goward, S.N.; Dye, D.G.; Turner, S.; Yang, J. Objective assessment of the NOAA Global Vegetation Index Data Product. **International Journal of Remote Sensing**, 14(16):3365-3394, 1993.
- Greenberg, H. **How I did the precipitation maps**. hgreen@bigdirt.geology.washington.edu. Mensagem pessoal. 16 may 1996.
- Gupta, R.K. District level NOAA/AVHRR vegetation index and scan angle effects. **International Journal of Remote Sensing**, 13(4):715-735, 1992.

Gutman, G.G. Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. **Remote Sensing of Environment**, (35):121-136, 1991.

Hielkema, J.U.; Prince, S.D.; Astle, W.L. Rainfall and vegetation monitoring in the Savanna Zone of the Democratic Republic of Sudan using the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1499-1513, 1986.

Holben, B.N. Characteristics of maximum value composites images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1417-1434, 1986.

Huete, A.R.; Tucker, C.J. Investigation of soil influences in AVHRR vegetation imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 12(6):1223-1242, 1991.

Instituto Brasileiro de Geografia e Desenvolvimento (IBGE); Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF). **Mapa de vegetação do Brasil. 1:5.000.000**. IBGE, Rio de Janeiro, 1994, 1 p., 2ª ed.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) **Deforestation in Brazilian Amazonia**. São José dos Campos, INPE, 1992, 4p.

Jackson, R.D., Huete, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, (11):185-200, 1991.

Jackson, R.D.; Slater, P.N.; Pinter Jr.; P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, (13):187-208, 1983.

Justice, C.O.; Townshend, J.R.G.; Holben, B.N.; Tucker, C.J. Analysis of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 6(8):1271-1318, 1985.

- Justice, C.O.; Dugdale, G.; Townshend, J.R.G.; Narracott, A.S.; Kumar, M. Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semi-arid West Africa. **International Journal of Remote Sensing**, **12**(6):1349-1368, 1991a.
- Justice, C.O.; Eck, T.F.; Tanré, D.; Holben, B.N. The effect of water vapour on the normalized difference vegetation index derived for the Sahelian region from NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, **12**(6):1165-1187, 1991b.
- Kaufman, Y.J. The effect of subpixel clouds on remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, **8**(6):839-857, 1987.
- Kaufman, Y.J.; Holben, B.N. Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. **International Journal of Remote Sensing**, **14**(1):21-52, 1993.
- Kerr, Y.H.; Imbernon, J.; Dedieu, G.; Hautecoeur, O.; Lagouarde, J.P.; Seguin, B. NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, **10**(4)-5:847-854, 1989.
- Kidwell, K.B. **NOAA polar orbiter data (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11 and NOAA-12): users guide**. Washington, D.C., NOAA/NESS, July 1991.
- Kidwell, K.B. **NOAA polar orbiter data users guide (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11, NOAA-12, NOAA-13 and NOAA-14)**. Washington, D.C., NOAA/NESDIS, June 1995.

- Liu, W.T.H. Monitoring AVHRR vegetation index of Brazil during 1981/1987. In: Seminário Internacional sobre estimativa da biomassa terrestre e da produção agrícola via satélite, São Paulo, 1990. **Anais.** São Paulo, CNPq, 1990, p.9-44.
- Los, S.O. Calibration adjustment of the NOAA AVHRR Normalized Difference Vegetation Index without recourse to component channel 1 and 2 data. **International Journal of Remote Sensing**, **14**(10):1907-1917, 1993.
- Los, S.O.; Justice, C.O.; Tucker, C.J. A global 1°x1° degree NDVI data set for climate studies regions. **International Journal of Remote Sensing**, **15**(17):3493-3518, 1994.
- Nicholson, S.E.; Davenport, M.L.; Malo, A.R. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using Normalized Difference Vegetation Index from AVHRR-NOAA. **Climate Change**, (17):209-241, 1990.
- Nicholson, S.E.; Farrar, T.J. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semi-arid Botswana. I. NDVI response to rainfall. **Remote Sensing of Environment**, (50):107-120, 1994.
- PCI **EASI User's Guide**. version 5.2, 1993.
- Research Systems Inc. **IDL User's Guide, Interactive Data Language**. version 3.1, 1993a.
- Research Systems Inc. **IDL Reference Guide, Interactive Data Language**. version 3.1, 1993b.

- Rouse, J.W.; Hass, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., 1973. **Proceedings**. Washington, 1973, v.1, Sec. A, p. 309-317.
- Santos, J.R.; Shimabukuro, Y.E. O Sensoriamento Remoto como indicador das fenofases dos cerrados brasileiros: Estudo de caso com dados AVHRR-NOAA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. Curitiba, Maio 10-14, 1993. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1993, v.2, p. 249-257.
- 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**, 16(15):2755-2777, 1995.
- Sellers, P.J.; Schimel, D. Remote sensing of the land biosphere and biochemistry in the EOS era: science priorities, methods and implementation-EOS land biosphere and biochemical panels. **Global and Planetary Change**, (7):279-297, 1993.
- Soufflet, V; Tanré, D.; Begue, A.; Podaire, A; Deschamps, P.Y. Atmospheric effects on NOAA AVHRR data over Sahelian regions **International Journal of Remote Sensing**, 12(6):1189-1203, 1991.
- Souza, R.C.; Câmara Neto, G.; Alves, D.S. O Desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica e de Processamento Digital de Imagens no INPE. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo, Maio de 1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1990, p. 168-173.
- Steffen, C.A.; Moraes, E.C. Introdução à radiometria. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. Curitiba, Maio 10-14, 1993, **Anais**, São José dos Campos, INPE, 1993, Tutorial 2. Radiometria espectral, p.2-12.

- 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**, **30**(2):231-248, 1992.
- Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, (8):127-150, 1979.
- Tucker, C.J.; Vanpraet, C.L.; Sharman, M.J.; Van Ittersum, G. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. **Remote Sensing of Environment**, (17):233-249, 1985a.
- Tucker, C.J.; Townshend, J.R.G.; Goff, T.E. African land-cover classification using satellite data. **Science**, (1227):369-375, 1985b.
- Tucker, C.J.; Sellers, P.J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, **7**(11):1395-1416, 1986.
- Wiegand, C.L.; Richardson, A.J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale. **Agronomy Journal**, **82**(3):623-629, 1990a.
- Wiegand, C.L.; Richardson, A.J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: II. Results. **Agronomy Journal**, **82**(3):630-636, 1990b.

APÊNDICE APROGRAMA PARA NAVEGAÇÃO DAS IMAGENS NDVI GERADAS PELO
NASA/GSFC**Autor: Virginia Kalb - NASA/GSFC****Linguagem: C**

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>

double pi, blow, ar, a, b, c, d, x, y;
int di, dj, i, j, ii, jj, ni, nj, mi, mj, iscan;

#define abs(x) (x>0?x:-x)
void usage()
{
printf("Usage: invmap -x <x coordinate> -y <y coordinate> \n ");
printf("where x and y are screen coordinates with (0,0) in the upper left corner\n");
exit(-1);
}

main()
{
int jsave, iflg, jold, iold, lin, col;
double alat, along;

pi = acos(-1.0);
di = 48; dj = 56;

/* define mapping parameters from NOTE file */
iscan = 5;
nj = 1024; ni = 1280; mi = 0; mj = 0;
a = -15.5; b = -64.0; ar = .5; blow = 5.5;

ii = (ni-di)/2; jj = (nj-dj)/2;
if (ar >= (double)ii/(double)jj) jj = (ii/ar+.5);
else ii = (jj*ar+.5);

printf("Formato: Linha Pixel Latitude Longitude \n", lin, col, alat, along);

for (lin=200; lin<700; lin++)
{
i=lin+180;
i++;

```

```

for (col=100; col<200; col++)
{
    j=col+208;
    j++;
    x = (i-ni/2-mi-.5)/(blow*(double)ii);
    y = (j-nj/2-mj-.5)/(blow*(double)jj);
    printf("x=%f y=%f \n",x,y);
    iflg = rj37(x, y, &alat, &along);

    if(iflg == 1)
    {
        printf("%d %d %lf %lf \n", lin, col, alat, along);
    }
    else
        printf("Error in inverting these coordinates\n");
}
}

#define MAXITER 50

double deg2rad(deg)
    double deg;
{
    return (deg*pi/180.);
}
double rad2deg(rad)
    double rad;
{
    return (rad*180./pi);
}

int rj37(x, y, alat, along)
    double x, y, *alat, *along;
{
    double a0, a1, a2, a3, b0, b1, b2, b3, drad, bmin, bmax, btemp, denom, ddeg,
           fx1, fx2, fx3, fy, x0;
    int iter, itarget, jtarget, inew, jnew;
    static int ifirst = 0;
    static double epsilon = 1.0E-38;
    static double delta, twopi;
    ifirst=0;

    if (ifirst == 0) {
        delta = pi/6;
        twopi = 2*pi;
        a0 = deg2rad(a); b0 = deg2rad(b);
        denom = sqrt(1.+cos(a0));
        x0 = -sin(a0)/sqrt(1.+cos(a0));
        inew = -999; jnew = -999;
        ifirst = 1;
    }

```

```

if(((x-x0)*(x-x0) + (y*y)) > 1.) return(-1);
if(abs(y) < epsilon) {
    *along = b;
    *alat = rad2deg(asin(-(x-x0)));
    return(1);
}

a1 = a0; b1 = b0; a2 = a0; b2 = b0; a3 = a0; b3 = b0; iter = 0;
if(x > 0 && y > 0) { a2 = a2-delta; b2 = b2+delta; }
if(x < 0 && y > 0) { a2 = a2+delta; b2 = b2+delta; }
if(x < 0 && y < 0) { a2 = a2+delta; b2 = b2-delta; }
if(x > 0 && y < 0) { a2 = a2-delta; b2 = b2-delta; }
bmin = b0-pi; bmax = b0+pi;

denom = sqrt(1.+cos(a1)*cos((b1-b0)/2.));
fx1 = -sin(a1)/denom - x0;
denom = sqrt(1.+cos(a2)*cos((b2-b0)/2.));
fx2 = -sin(a2)/denom - x0;
itarget = (x*ii)*blow+mi+ni/2+1.;
jtarget = (y*jj)*blow+mj+nj/2+1.;
while ((itarget != inew) || (jtarget != jnew) || iter == 0)
{
    if(iter >= 1)
        { b1 = b2; b2 = b3; fx1 = fx2; fx2 = fx3; }
    iter++;
    if(iter > MAXITER || (fx1 == fx2)) {
        *alat = rad2deg(a3); *along = rad2deg(b3);
        return(-1);
    }
    b3 = b2-(fx2-x)*(b2-b1)/(fx2-fx1);
    while(b3 > bmax) b3 = b3-2*pi;
    while(b3 < bmin) b3 = b3+2*pi;
    btemp = (b3-b0)/2.;
    a3 = atan(-(x-x0)*sin(btemp)/y);
    denom = sqrt(1.+cos(a3)*cos(btemp));
    fx3 = -sin(a3)/denom - x0;
    fy = cos(a3)*sin(btemp)/denom;
    inew = (fx3*ii)*blow+mi+ni/2+1.;
    jnew = (fy*jj)*blow+mj+nj/2+1.;
}
a1 = a2; b1 = b2; a2 = a3; b2 = b3; fx1 = fx2; fx2 = fx3;
while(a3 > pi/2) a3 = a3-pi;
while(a3 < -pi/2) a3 = a3+pi;
while(b3 > pi) b3 = b3-twopi;
while(b3 < -pi) b3 = b3+twopi;
*alat = rad2deg(a3); *along = rad2deg(b3);
return(1);
}

```


APÊNDICE B

PROGRAMA PARA EXTRAÇÃO DA MÉDIA DE 3X3 PIXELS NDVI/GAC NO PERÍODO DE JANEIRO/82 A DEZEMBRO/90

Autor: Eugênio Sper de Almeida - INPE

Linguagem: IDL

```
mes_ano= strarr(150)
arquivo= strarr(150)
eixox = intarr(108)
valor_ndvi = intarr(108)
;media3x3=fltarr(256)

;vetor de meses do ano
c=['1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12']

;vetor de colunas

col_a=[336,268,472,314,321,405,341,490,454,497,461,262,281,329,442,378,408,349,416,442,
452,441,344,424,285,456,406,353,452,423,463,378,358,385,385]

col_b=[359,406,326,269,385,397,415,461,307,347,485,395,369,443,375,430,403,487,438,334,
456,448,258,396,434,439,261,485,314,347,305,363,421,339]

col_c=[405,288,339,298,365,387,440,370,362,400,319,287,364,270,332,350,309,275,448,334,
317,319,290,281,429,263,319,319]

col_d=[503,509,339,492,405,253,513,214,243,526,509,476,535,501,467,526,224,252,212,527,
515,513,224,215,475,239,525,239,206,283,205,223,181,200,221,240,159,491,230,220,504,195,
,168,201,146,178,162,253,182]

col_e=[161,249,218,410,159,200,320,229,215,162,250,175,241,200]

;vetor de linhas

lin_a=[206,211,213,216,222,229,231,231,231,234,234,236,236,236,237,373,380,380,371,383,
384,372,239,242,244,246,247,249,249,249,251,252,254,241,255]

lin_b=[260,261,262,265,267,267,269,269,269,270,270,257,257,276,278,282,282,282,283,282,
285,273,285,285,274,291,292,294,301,301,290,290,291,307]

lin_c=[308,310,310,313,305,317,305,324,325,326,329,329,332,333,335,336,341,343,338,352,
358,361,362,364,366,366,368,369]

lin_d=[208,213,213,216,208,208,226,228,232,233,236,236,238,224,239,251,253,254,254,241,
241,262,262,264,266,256,270,275,275,277,277,282,283,283,295,302,290,305,313,314,317,318,
,325,327,328,322,331,333,333]
```

```
lin_e=[342,349,351,352,353,340,356,354,359,361,360,361,369,356]
```

```
;vetor de nomes
```

```
nome_a=['a_1','a_2','a_5','a_6','a_7','a_8','a_11','a_13','a_14','a_15','a_16','a_18','a_19','a_21','a_22','a_23','a_26','a_27','a_28','a_29','a_30','a_33','a_34','a_35','a_36','a_37','a_39','a_40','a_42','a_43','a_44','a_46','a_47','a_49','a_50']
```

```
nome_b=['b_1','b_2','b_4','b_6','b_7','b_8','b_9','b_11','b_10','b_12','b_13','b_14','b_15','b_17','b_18','b_19','b_20','b_21','b_23','b_24','b_27','b_29','b_30','b_31','b_34','b_36','b_37','b_38','b_45','b_46','b_47','b_48','b_49','b_50']
```

```
nome_c=['c_1','c_2','c_3','c_4','c_5','c_7','c_9','c_10','c_11','c_14','c_16','c_17','c_19','c_20','c_21','c_22','c_24','c_26','c_28','c_31','c_33','c_35','c_36','c_39','c_43','c_44','c_47','c_48']
```

```
nome_d=['d_1','d_2','d_3','d_4','d_5','d_6','d_7','d_8','d_9','d_10','d_11','d_12','d_13','d_14','d_15','d_16','d_17','d_18','d_19','d_20','d_21','d_22','d_23','d_24','d_25','d_26','d_27','d_28','d_29','d_30','d_31','d_32','d_33','d_34','d_35','d_36','d_37','d_38','d_39','d_40','d_41','d_42','d_43','d_44','d_45','d_46','d_47','d_48','d_49']
```

```
nome_e=['e_1','e_2','e_3','e_4','e_5','e_6','e_7','e_8','e_9','e_10','e_11','e_12','e_13','e_14']
```

```
; seleciona janela 0 e tabela de cores de 16 niveis
```

```
window,XSIZE=816,YSIZE=1100,0
```

```
; visualiza 108 imagens NDVI contidas no arq. ndvi.i
```

```
openr,1,'/home/eugenio/NDVI/ndvi.i'
```

```
a= bytarr(816,1100,108,nozero)
```

```
readu,1,a
```

```
close,1
```

```
ndvi= a(*,*,1)
```

```
!order=1
```

```
tv,ndvi
```

```
openw,2,'/home/eugenio/NDVI/ndvi2.txt'
```

```
for i=0, 34 do begin
```

```
xyouts,col_a(i),(1100-lin_a(i)),'+',COLOR=0,/DEVICE
```

```
media3x3 = ( float(a(col_a(i)-1,lin_a(i)-1,*)) + a(col_a(i)-1,lin_a(i),*) + a(col_a(i)-1,lin_a(i)+1,*) + a(col_a(i),lin_a(i)-1,*) + a(col_a(i),lin_a(i),*) + a(col_a(i),lin_a(i)+1,*) + a(col_a(i)+1,lin_a(i)-1,*) + a(col_a(i)+1,lin_a(i),*) + a(col_a(i)+1,lin_a(i)+1,*) )/9
```

```
printf, 2,'Linha: ',lin_a(i),' Coluna: ',col_a(i),' ',nome_a(i),transpose(
(media3x3/127.5)-1 )
```

```
endfor
```

```
for i=0, 33 do begin
```

```
xyouts,col_b(i),(1100-lin_b(i)),'+',COLOR=0,/DEVICE
```

```
media3x3 = ( float(a(col_b(i)-1,lin_b(i)-1,*)) + a(col_b(i)-1,lin_b(i),*) + a(col_b(i)-1,lin_b(i)+1,*) + a(col_b(i),lin_b(i)-1,*) + a(col_b(i),lin_b(i),*) + a(col_b(i),lin_b(i)+1,*) + a(col_b(i)+1,lin_b(i)-1,*) + a(col_b(i)+1,lin_b(i),*) + a(col_b(i)+1,lin_b(i)+1,*) )/9
```

```

        printf,2,'Linha: ',lin_b(i),' Coluna: ',col_b(i),' ',nome_b(i),transpose(
(media3x3/127.5)-1 )
    endfor

for i=0, 27 do begin
    xyouts,col_c(i),(1100-lin_c(i)),'+',COLOR=0,/DEVICE

    media3x3 = ( float(a(col_a(i)-1,lin_c(i)-1,*)) + a(col_c(i)-1,lin_c(i),*) + a(col_c(i)-
1,lin_c(i)+1,*) + a(col_c(i),lin_c(i)-1,*) + a(col_c(i),lin_c(i),*) + a(col_c(i),lin_c(i)+1,*) +
a(col_c(i)+1,lin_c(i)-1,*) + a(col_c(i)+1,lin_c(i),*) + a(col_c(i)+1,lin_c(i)+1,*) )/9

    printf, 2,'Linha: ',lin_c(i),' Coluna: ',col_c(i),' ',nome_c(i),transpose(
(media3x3/127.5)-1 )

endfor

for i=0, 48 do begin
    xyouts,col_d(i),(1100-lin_d(i)),'+',COLOR=0,/DEVICE
    media3x3 = ( float(a(col_d(i)-1,lin_d(i)-1,*)) + a(col_d(i)-1,lin_d(i),*) + a(col_d(i)-
1,lin_d(i)+1,*) + a(col_d(i),lin_d(i)-1,*) + a(col_d(i),lin_d(i),*) + a(col_d(i),lin_d(i)+1,*) +
a(col_d(i)+1,lin_d(i)-1,*) + a(col_d(i)+1,lin_d(i),*) + a(col_d(i)+1,lin_d(i)+1,*) )/9

    printf, 2,'Linha: ',lin_d(i),' Coluna: ',col_d(i),' ',nome_d(i),transpose(
(media3x3/127.5)-1 )
endfor

for i=0, 13 do begin
    xyouts,col_e(i),(1100-lin_e(i)),'+',COLOR=0,/DEVICE
    media3x3 = ( float(a(col_e(i)-1,lin_e(i)-1,*)) + a(col_e(i)-1,lin_e(i),*) + a(col_e(i)-
1,lin_e(i)+1,*) + a(col_e(i),lin_e(i)-1,*) + a(col_e(i),lin_e(i),*) + a(col_e(i),lin_e(i)+1,*) +
a(col_e(i)+1,lin_e(i)-1,*) + a(col_e(i)+1,lin_e(i),*) + a(col_e(i)+1,lin_e(i)+1,*) )/9
    printf, 2,'Linha: ',lin_e(i),' Coluna: ',col_e(i),' ',nome_e(i),transpose(
(media3x3/127.5)-1 )
endfor

close,1,2
end

```


APÊNDICE C

CALIBRAÇÃO DOS DADOS NDVI-GAC PARA DEGRADAÇÃO DO SENSOR

Tendo em vista a degradação dos sensores AVHRR do satélite NOAA e os múltiplos sensores utilizados para a geração da série temporal elaborado pelo grupo GIMMS, utilizou-se a formulação matemática proposta por Los (1993) para desenvolver um algoritmo para calibração dos dados NDVI. Esta formulação baseia-se em informações de pré-lançamento e coletadas de desertos e mares (Kaufman e Holben, 1993), para a calibração dos dados NDVI sem recorrer ao canais 1 e 2. As equações do modelo 3 proposto por Los (1993) foram trabalhadas a partir da Equação 2.2 e dos parâmetros da Equação 2.1 (p. 19) para que possam ser utilizadas neste algoritmo:

$$NDVI_t = \frac{r_1(SR_p + \Delta_{2,p}[-4,34 + 7,48 * SR_p]) - r_2(1 + \Delta_{1,p}[-4,34 + 7,48 * SR_p])}{r_1(SR_p + \Delta_{2,p}[-4,34 + 7,48 * SR_p]) + r_2(1 + \Delta_{1,p}[-4,34 + 7,48 * SR_p])}$$

$$\text{Como } SR_p = \frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \text{ tem-se:}$$

$$NDVI_t = \frac{r_1 \left(\left(\frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \right) + \Delta_{2,p} \left(-4,34 + 7,48 * \left(\frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \right) \right) \right) - r_2 \left(1 + \Delta_{1,p} \left(-4,34 + 7,48 * \left(\frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \right) \right) \right)}{r_1 \left(\left(\frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \right) + \Delta_{2,p} \left(-4,34 + 7,48 * \left(\frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \right) \right) \right) + r_2 \left(1 + \Delta_{1,p} \left(-4,34 + 7,48 * \left(\frac{1 + NDVI_p}{1 - NDVI_p} \right) \right) \right)}$$

Os valores de $\Delta_{1,p}$ e $\Delta_{2,p}$ são obtidos a partir de:

$$\Delta_{1,p} = \gamma_{1,p} * \Delta C_{0,1} \quad \text{e} \quad \Delta_{2,p} = \gamma_{2,p} * \Delta C_{0,2}$$

$$\gamma_{i,p} = \frac{\alpha_{i,p} * \pi * R^2}{F_{s,i}}$$

onde:

iCanais do sensor (1 e 2)

$\Delta C_{(i)}$..Diferença entre o número digital de visada do espaço real (gravado em fita) e de pré-lançamento;

$\gamma_{(i,p)}$...Coeficiente de pré-calibração;

$\alpha_{(i,p)}$...Ganho de calibração de pré-lançamento;

$F_{(0,i)}$...Fluxo solar;

RDistância do Sol-Terra;

Segundo Los (1993) os dados de ganho (a) e fluxo solar incidente (F), fornecidos pela NOAA são:

TABELA C.1 - VALORES DE GANHIO DE CALIBRAÇÃO (α) E FLUXO SOLAR(F_0)

	a	$a_{(p)}$	$F_{(0,i)}$	$F_{(0,i)}$
NOAA-7	0,56	0,35	1649	1040
NOAA-9	0,55	0,36	1629	1043
NOAA-11(old)	0,47	0,28	1630	1053
NOAA-11(new)	0,49	0,30	1630	1053

FONTE: Los (1993), p. 1917

Logo podemos computar os coeficientes de calibração (γ) que são dependentes do fluxo solar incidente (F) e do ganho (a), que é dependente do sensor:

TABELA C.2 - VALORES DE COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO

Satélite	γ	$\gamma_{(p)}$
NOAA-7	0,0010668	0,0010572
NOAA-9	0,0010607	0,0010843
NOAA-11(old)	0,0009058	0,0008353
NOAA-11(new)	0,0009444	0,0008950

FONTE: Baseada em Los (1993)

Os valores de degradação do sensor (r_i) e $\Delta C_{o,i}$ são variáveis com o tempo e são dados pelas seguintes equações:

NOAA_7:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,9443 - 0,05165 * (\text{dia_1981}) + 0,00450 * (\text{dia_1981})^2 \\ r_2 &= 0,9368 - 0,09832 * (\text{dia_1981}) + 0,01325 * (\text{dia_1981})^2 \\ \Delta C_{o,1} &= -3,7003 - 0,22295 * (\text{dia_1981}) + 0,09980 * (\text{dia_1981})^2 \\ \Delta C_{o,2} &= -5,5469 + 0,26995 * (\text{dia_1981}) \end{aligned}$$

NOAA_9:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,9599 - 0,05854 * (\text{dia_1985}) + 0,002331 * (\text{dia_1985})^2 \\ r_2 &= 0,8911 - 0,04870 * (\text{dia_1985}) + 0,005290 * (\text{dia_1985})^2 \\ \Delta C_{o,1} &= -1,9044 + 0,17611 * (\text{dia_1985}) - 0,02504 * (\text{dia_1985})^2 \\ \Delta C_{o,2} &= -4,2445 + 0,82006 * (\text{dia_1985}) - 0,12508 * (\text{dia_1985})^2 \end{aligned}$$

NOAA_11_old (até 27 de setembro de 1990):

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,7837 - 0,00210 * (\text{dia_1989}) + 0,00094 * (\text{dia_1989})^2 \\ r_2 &= 0,6964 - 0,02887 * (\text{dia_1989}) + 0,00951 * (\text{dia_1989})^2 \\ \Delta C_{o,1} &= 1,2 \quad \Delta C_{o,2} = 1,0 \end{aligned}$$

NOAA_11_new (iniciando em 27 de setembro de 1990):

$$\begin{aligned} r_1 &= r_{1, \text{NOAA-11-old}} * (0,95/0,906) \\ r_2 &= r_{2, \text{NOAA-11-old}} * (0,90/0,827) \\ \Delta C_{o,1} &= -0,2 \quad \Delta C_{o,2} = 0,0 \end{aligned}$$

Nota-se que devido à mudança dos coeficientes de pré-lançamento na fita para os canais 1 e 2 do NOAA-11 em 27 de setembro de 1990, é utilizada a notação “old” e “new” para fazer esta diferenciação.

APÊNDICE DPROGRAMA PARA GERAR MAPA DE CORRELAÇÃO LOGARÍTMICA
ENTRE NDVI E PRECIPITACAO - LAG=2**Autor: Eugênio Sper de Almeida - INPE****Linguagem: IDL**

```

;pro cor_map_log_lag2.pro
valor_ndvi = intarr(108)
valor_precip = intarr(108)
eixox = intarr(20)
eixoy = intarr(20)
barnome=strarr(21)
color= intarr(256)

openr,1,'/home/eugenio/eos/ndvi_fourier/ndvi_array.img'
a= assoc(1,bytarr(256,256))
openr,2,'/home/eugenio/eos/ndvi_fourier/precip.img'
b= assoc(2,bytarr(256,256))

ndvi=bytarr(256,256,106)
prec=bytarr(256,256,106)
saida = bytarr(256,256,/nozero)

barnome=['1.0','-0.9','-0.8','-0.7','-0.6', $
'-0.5','-0.4','-0.3','-0.2','-0.1', $
'0','0.1','0.2','0.3','0.4', $
'0.5','0.6','0.7','0.8','0.9','1.0']

for k=0, 255 do begin
    color=k
endfor

for k=0, 105 do begin
    ndvi(*,*,k)=a(k+2)
    prec(*,*,k)=b(k)
endfor

for k=0, 18 do begin
    eixoy(k)=0
    eixox(k)=0
endfor

```

```

for i=1, 254 do begin
  for j=1, 254 do begin
    media_ndvi = (ndvi(i-1,j-1,*)+ndvi(i-1,j,*)+ndvi(i-1,j+1,*)+ndvi(i,j-1,*)+ndvi(i,j,*)+ndvi(i,j+1,*)+ndvi(i+1,j-1,*)+ndvi(i+1,j,*)+ndvi(i+1,j+1,*) )/9
    media_prec = (prec(i-1,j-1,*)+prec(i-1,j,*)+prec(i-1,j+1,*)+prec(i,j-1,*)+prec(i,j,*)+prec(i,j+1,*)+prec(i+1,j-1,*)+prec(i+1,j,*)+prec(i+1,j+1,*) )/9

    valor= correlate ( alog(10+prec(i,j,*)), ndvi(i,j,*))
    if ( (valor GE -1.0) AND (valor LE -0.9) ) then begin
      eixoy(0)=eixoy(0)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.9) AND (valor LE -0.8) ) then begin
      eixoy(1)=eixoy(1)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.8) AND (valor LE -0.7) ) then begin
      eixoy(2)=eixoy(2)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.7) AND (valor LE -0.6) ) then begin
      eixoy(3)=eixoy(3)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.6) AND (valor LE -0.5) ) then begin
      eixoy(4)=eixoy(4)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.5) AND (valor LE -0.4) ) then begin
      eixoy(5)=eixoy(5)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.4) AND (valor LE -0.3) ) then begin
      eixoy(6)=eixoy(6)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.3) AND (valor LE -0.2) ) then begin
      eixoy(7)=eixoy(7)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.2) AND (valor LE -0.1) ) then begin
      eixoy(8)=eixoy(8)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT -0.1) AND (valor LE 0.0) ) then begin
      eixoy(9)=eixoy(9)+1
      saida(i,j)=0
    endif
    if ( (valor GT 0.0) AND (valor LE 0.1) ) then begin
      eixoy(10)=eixoy(10)+1
      saida(i,j)=0
    endif
  endfor
endfor

```

```

        if ( (valor GT 0.1) AND (valor LE 0.2) ) then begin
            eixoy(11)=eixoy(11)+1
            saida(ij)=1
        endif
        if ( (valor GT 0.2) AND (valor LE 0.3) ) then begin
            eixoy(12)=eixoy(12)+1
            saida(ij)=2
        endif
        if ( (valor GT 0.3) AND (valor LE 0.4) ) then begin
            eixoy(13)=eixoy(13)+1
            saida(ij)=3
        endif
        if ( (valor GT 0.4) AND (valor LE 0.5) ) then begin
            eixoy(14)=eixoy(14)+1
            saida(ij)=4
        endif
        if ( (valor GT 0.5) AND (valor LE 0.6) ) then begin
            eixoy(15)=eixoy(15)+1
            saida(ij)=5
        endif
        if ( (valor GT 0.6) AND (valor LE 0.7) ) then begin
            eixoy(16)=eixoy(16)+1
            saida(ij)=6
        endif
        if ( (valor GT 0.7) AND (valor LE 0.8) ) then begin
            eixoy(17)=eixoy(17)+1
            saida(ij)=7
        endif
        if ( (valor GT 0.8) AND (valor LE 0.9) ) then begin
            eixoy(18)=eixoy(18)+1
            saida(ij)=8
        endif
        if ( (valor GT 0.9) AND (valor LE 1.0) ) then begin
            eixoy(19)=eixoy(19)+1
            saida(ij)=9
        endif
    endif
endfor
endifor

openr,3,'/home/eugenio/eos/ndvi_fourier/station/limite3.img'
c= assoc(3,bytarr(256,256))
limite2=c(0)
limite1=rebin(limite2,512,512)

window,xsize=512,ysize=512, 5
;imag=saida(8)
!order=1
saida1=rebin(saida,512,512)
;tv,sobel(limite1*100)+saida1
tv,saida1
stretch,0,9

```

```
window,1
    bar_plot, eixoy(*), $
    OUTLINE=1, BARNAMES=barnome, BARSPACE=0.05, $
    BARWIDTH=1.0,BAROFFSET=-0.5, $
    title='Histograma da Correlacao NDVI x PRECIPITACAO', $
    xtitle='CORRELACAO', ytitle='No. valores correlatos'
    loadct,6

close,1,2,3
end
```