



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5580-TDI/543

**DETECÇÃO DE DESMATAMENTO NA FLORESTA AMAZÔNICA
ATRAVÉS DE IMAGENS AVHRR/NOAA E DO SISTEMA DE
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS SGI: METODOLOGIA E TESTE
DE UM SISTEMA POTENCIAL DE ALERTA**

Angélica Carvalho Di Maio Mantovani

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo
Dr. Alberto Waingort Setzer, aprovada em fevereiro de 1994

528.854

MANTOVANI, A.C. DI M.

Detecção de desmatamentos na floresta amazônica através de imagens AVHRR/NOAA e do sistema de informações geográficas SGI: metodologia e teste de um sistema potencial de alerta / Angelica Carvalho Di Maio Mantovani. -- São José dos Campos : INPE, 1994.

114p. - (INPE-5580-TDI/543)

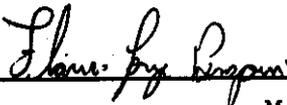
1. Desmatamento. 2. Floresta Amazônica (AM). 3. SGI. 4. Imagens de satélites. I. Título.

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

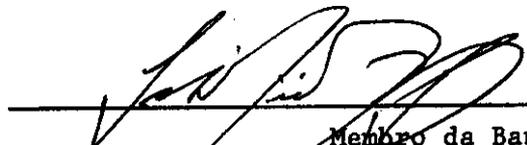
Dr. Alberto Waingort Setzer


Orientador/Presidente

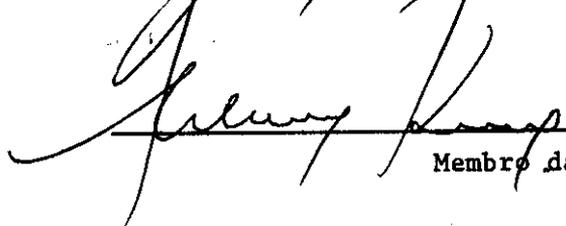
Dr. Flávio Jorge Ponzoni


Membro da Banca

Dr. Getúlio Teixeira Batista


Membro da Banca

Dra. Thelma Krug


Membro da Banca

Dr. Evaristo Eduardo de Miranda


Membro da Banca
- Convidado -

Candidata: Angélica Carvalho Di Maio Mantovani

São José dos Campos, 24 de fevereiro de 1994

"Enquanto a espécie humana se expande e submete os ecossistemas naturais a pressões crescentes, reduzem-se paulatinamente as áreas por eles ocupadas e degradam-se os ambientes que condicionam a existência das demais formas de vida" (Câmara, 1986).

A Ferdinando, Isabel e
Magnolia pelo imenso amor.
A Ari pelo grande incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Alberto W. Setzer, pela orientação, apoio, incentivo e amizade. Pela sua admirável capacidade científica, responsável por preciosas críticas construtivas.

Ao amigo querido Aníbal E. Fernandes pelo apoio, pela enorme boa-vontade e ajuda com a elaboração e manipulação de programas fundamentais à realização deste trabalho.

Aos amigos queridos Silvana Amaral, Marcos Costa Pereira e Alfredo Costa Pereira Junior que muito contribuíram com valiosas sugestões e discussões.

A querida amiga Eliana Maria Kalil Mello pela valiosa colaboração e incentivo.

A José Eduardo Mantovani pela paciência e cooperação em vários momentos difíceis.

As amigas Iara Musse Felix, Sandra Maria Fonseca da Costa e Ana Lúcia Candeias pela atenção dispensada.

Aos amigos Guaracy J. Erthal, Júlio César L. D'Álge, Flávio Jorge Ponzoni e Gerald Jean F. Bannon pela contribuição técnica neste trabalho.

A José Luis de Oliveira pelo apoio no procedimento de leitura de fitas no Laboratório de Meteorologia do INPE.

A Marilene A. Silva pela amizade e auxílio em questões administrativas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,
CAPES e FAPESP pelo apoio logístico e financeiro respecti-
vamente.

A Universidade do Vale do Paraíba, em espe-
cial ao Prof. Francisco José Mendonça pela compreensão e
apoio.

A todos aqueles que de alguma forma colabo-
raram na realização deste trabalho.

Angelica C. Di Maio Mantovani

S. J. dos Campos, 10 de dezembro de 1993.

RESUMO

A rápida transformação na cobertura florestal da Amazônia vem despertando preocupação mundial em relação ao impacto causado ao meio ambiente. Este trabalho descreve resultados obtidos no desenvolvimento de uma metodologia de baixo custo para um sistema de detecção de novos desmatamentos na floresta tropical Amazônica. Este sistema combina imagens classificadas do sensor "Advanced Very High Resolution Radiometer" (NOAA/AVHRR) e um Sistema de Informações Geográficas (SIG/INPE). Imagens AVHRR, banda 3 (3,5µm a 3,9µm) de diferentes datas, corrigidas geometricamente, com resolução de 1,1 km, foram comparadas automaticamente em formato digital. Os locais onde foram detectadas mudanças na cobertura original da floresta, em qualquer par de imagens, são determinados no SIG. Testes realizados em uma região no norte do Mato Grosso foram apresentados, indicando a possibilidade do uso de imagens AVHRR operacionalmente na detecção de novos desmatamentos. Os resultados obtidos, comparando-se os desmatamentos verificados nas imagens AVHRR com os correspondentes dados de alta resolução Landsat-Thematic Mapper (TM), indicaram 49,1% e 56,56% de localização correta no AVHRR, na análise de 216 e 221 polígonos de desmatamentos de diferentes tamanhos, para os pares de imagens de setembro de 1989 e setembro de 1990, e de julho de 1990 com setembro de 1990, respectivamente. Nas mesmas imagens foram obtidos respectivamente 82% e 90% de acerto para 50 polígonos de desmatamentos observados com tamanho mínimo de 3,1 km².

DETECTION OF DEFORESTATION IN THE AMAZON FOREST USING
NOAA/AVHRR IMAGES AND THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM
SGI: METHODOLOGY AND TEST OF A POTENCIAL ALARM SYSTEM

ABSTRACT

The rapid change in the Amazon forest cover has been causing a global concern in association with its impact to the environment. This work describes the results obtained from a low-cost methodology developed to locate new deforestation in the Amazon tropical forest. It combines automatic classification of the Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR) images and a Geographic Information System (GIS). Full resolution and geometrically corrected AVHRR channel 3 (3.5um a 3.9um) images of different dates were automatically compared in digital form. Changes in the original cover of the vegetation are detected in any two different images, and their locations were determined through the GIS. Tests in the northern of the state of Mato Grosso were presented indicating the possibility of using AVHRR imagery operationally to detect new deforestation. Results comparing deforestation in the AVHRR channel 3 with corresponding high resolution Landsat-Thematic Mapper (TM) images indicated 49.1% and 56.5% of AVHRR correct location for 216 and 221 polygons of deforestation with different sizes, for two pairs of images, September 1989 and September 1990, and July 1990, and September 1990 respectively. 82% and 90% of correct locations were obtained for the 50 TM polygons with deforestation greater than 3.1km² for the same pairs of images.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xix
LISTA DE TABELAS.....	xxi
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</u>	<u>1</u>
1.1 - Objetivos.....	4
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</u>	<u>7</u>
2.1 - Considerações sobre a floresta Amazônica e o o desmatamento.....	7
2.2 - Detecção de desmatamento por sensoriamento re- moto.....	13
2.2.1 - Comportamento espectral da cobertura vegetal..	13
2.2.2 - Fatores que influenciam na resposta espec- tral da cobertura vegetal obtida por senso- res orbitais.....	18
2.3 - O sistema sensor AVHRR/NOAA.....	22
2.3.1 - O AVHRR na avaliação de alterações na cober- tura vegetal da Amazônia.....	26
2.4 - Sistema de processamento digital de imagens....	30
2.4.1 - O SITIM.....	31
2.4.2 - Considerações sobre técnicas de classifica- ção de imagens digitais.....	33
2.4.2.1 - Influência da resolução espacial na clas- sificação.....	36
2.5 - O sistema de informações geográficas.....	39
2.5.1 - O sistema de informações geográficas do INPE.	45
2.5.2 - Integração dos dados de sensoriamento remoto no SIG.....	46

2.5.3 - O SIG em aplicações na avaliação de desmatamentos por sensoriamento remoto.....	49
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	55
3.1 - Área de estudo.....	55
3.2 - Materiais e equipamentos.....	57
3.2.1 - Imagens AVHRR.....	57
3.2.2 - Cartas temáticas.....	58
3.2.3 - Arquivo de cartas digitais.....	60
3.2.4 - Sistema de tratamento de imagens (SITIM).....	60
3.2.5 - Sistema de informações geográficas (SIG).....	60
3.3 - Métodos.....	60
3.3.1 - Seleção dos produtos de sensoriamento remoto.	60
3.3.1.1 - Gravação da área de estudo.....	61
3.3.2 - Processamento digital das imagens AVHRR.....	61
3.3.2.1 - O problema de nuvens.....	63
3.3.2.2 - Avaliação radiométrica das imagens AVHRR...	64
3.3.2.3 - Classificação.....	64
3.3.3 - Integração dos dados no SGI.....	65
3.3.3.1 - Manipulação dos dados.....	66
3.3.3.2 - Comparação dos dados AVHRR e TM para aferição dos resultados.....	69
3.3.3.3 - Saída.....	72
3.4 - Fluxograma de trabalho.....	72
3.5 - Resumo da metodologia.....	74
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	75
4.1 - Correção geométrica das imagens AVHRR.....	75
4.2 - Classificação das imagens AVHRR.....	79
4.3 - Manipulação dos dados no SGI.....	84
4.3.1 - Aferição dos resultados.....	86
4.3.1.1 - Análise puntual.....	86

4.3.1.2 - Análise do cálculo de área.....	91
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u>	<u>95</u>
5.1 - Conclusões.....	95
5.2 - Recomendações.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Curvas do comportamento espectral de um dossel vegetal e do solo.....	15
2.2 - Perfil da correspondência inversa entre o IVDN e a temperatura da superfície em uma área próxima a cidade de Arquimedes (RO).....	30
3.1 - (a) Localização da área de estudo, correspondente a folha 1:1.000.000 "Juruena", (b) Localização das áreas amostrais utilizadas na aferição dos dados obtidos - cartas 1:250.000, MIR 274, 297, 298, 319 e 320.....	57
3.2 - Fluxograma de trabalho.....	73
4.1 - Imagem AVHRR banda 2 com a indicação dos pontos utilizados na verificação da precisão de localização.....	77
4.2 - Imagens AVHRR banda 3: (a) imagem de setembro de 1989; (b) imagem de julho de 1990; e (c) imagem de setembro de 1990.....	78
4.3 - Histogramas das imagens AVHRR banda 3: (a) setembro de 1989; (b) julho de 1990; e (c) setembro de 1990.....	80
4.4 - Imagens AVHRR classificadas: (a) setembro de 1989; (b) julho de 1990; e (c) setembro de 1990	83
4.5 - Imagens AVHRR resultantes do cruzamento no SGI: (a) imagem de setembro de 1989 com setembro de 1990; e (b) imagem de julho de 1990 com setembro de 1990.....	85
4.6 - Áreas amostrais da imagem AVHRR resultante.....	92

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Características dos sistemas AVHRR/NOAA.....	24
3.1 - Imagens AVHRR/NOAA utilizadas.....	58
3.2 - Imagens TM/Landsat que originaram as cartas temáticas utilizadas.....	59
3.3 - Resumo da metodologia segundo as etapas, meios e finalidades de cada procedimento adotado.....	74
4.1 - Coordenadas dos pontos adquiridos para verifica- ção da precisão de localização.....	76
4.2 - Variação da resposta radiométrica da banda 3 para floresta em três imagens AVHRR diferentes.....	81
4.3 - Resultados obtidos da imagem AVHRR resultante do cruzamento da imagem de setembro de 1989 com a de setembro de 1990.....	86
4.4 - Resultados obtidos da imagem AVHRR resultante do cruzamento da imagem de julho de 1990 com a de setembro de 1990.....	87
4.5 - Porcentagem de polígonos maiores que 3,1 km ² corretamente identificados nas imagens AVHRR.....	89
4.6 - Quantidade total de polígonos de desmatamento de 1990 e porcentagem de "falsos alarmes", obser- vados nas imagens AVHRR resultantes.....	90
4.7 - Área total desmatada (em km ²) nas cinco áreas a- mostrais calculadas a partir de dados TM de 1990 e AVHRR de 89/90 e correspondente diferença.....	92

CAPÍTULO 1INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A Amazônia brasileira, com cerca de 5.000.000 Km², rica em recursos naturais, tem sido tema de estudos de técnicos e pesquisadores quanto à sua utilização mais apropriada. A significativa alteração da cobertura vegetal da Amazônia, de 21.130 km²/ano como média no período de 1978 a 1988 (INPE, 1992) tem provocado crescente preocupação mundial. De acordo com INPE (1992), estimativas baseadas em imagens orbitais revelaram um valor de 426.400 Km² de floresta desmatada na Amazônia legal brasileira até 1991.

A floresta tropical amazônica tem papel importante em vários ciclos biogeoquímicos, protegendo o solo da erosão e da lixiviação, mantendo nutrientes minerais no sistema através da reciclagem orgânica e da água, regulando o regime hidrológico dos rios e o clima, sendo um grande reservatório de carbono (Schubart, 1983; Salati, 1983).

Nas últimas décadas tornou-se notório que os recursos naturais estão cada vez mais escassos, que os efeitos das atividades antrópicas sobre o ambiente são cada vez mais intensos, e que o reconhecimento e previsão de suas causas e conseqüências são mais complexos. Também tem sido reconhecido que melhores métodos de avaliação e planejamento dos recursos produzem benefícios no gerenciamento dos recursos naturais.

O gerenciamento de recursos naturais inicia-se com o correto conhecimento dos ecossistemas regionais, que por sua vez, demanda conhecimento multidisciplinar. É através deste conhecimento que se torna possível implemen-

tar programas e projetos, minimizando ações antrópicas sobre os ecossistemas. O monitoramento da cobertura vegetal e do meio físico é outra exigência básica (Alho, 1986).

O sensoriamento remoto orbital possibilita o registro de dados multi-espectrais e multi-temporais, facilitando a interpretação de sucessivas imagens com informações de uma mesma região, com visão sinóptica da área. O desmatamento na Amazônia tem sido estudado principalmente utilizando-se dados do satélite Landsat e dados do satélite meteorológico da série NOAA (National Oceanographic Atmospheric Administration). Imagens do antigo MSS ("Multispectral Scanner") e do atual TM ("Thematic Mapper") dos satélites Landsat têm resoluções de 80 e 30m, sendo coletadas somente a cada 14 e 16 dias, respectivamente. Esta frequência de observação, aliada às altas probabilidades de ocorrência de nuvens e freqüente presença de fumaça derivada das queimadas das florestas, quase sempre resulta em número insuficiente de imagens disponíveis para o acompanhamento das mudanças na cobertura vegetal (Malingreau e Tucker, 1988; Justice et al., 1985). Conseqüentemente os dados dos sensores a bordo do Landsat não são sempre adequados para o fornecimento de estimativas atualizadas do desmatamento de florestas tropicais (Malingreau e Tucker, 1988).

O sensor TM, devido à sua alta resolução espacial e cobertura relativamente limitada da superfície terrestre por passagem (faixa de 185 km), torna mais difícil e dispendioso o levantamento de uma área muito extensa; por exemplo, para cobrir a Amazônia no território nacional são necessárias 229 cenas Landsat.

O trabalho de mapeamento de áreas desmatadas na Amazônia brasileira coordenado pelo INPE, envolveu por ano cerca de 30 técnicos em tempo integral, aproximadamente

200 imagens fotográficas TM/Landsat a 600 dolares cada, e uma dúzia de microcomputadores/SGI. O custo associado a esta iniciativa, ainda incompleta, foi de mais de um milhão de dolares.

Comparativamente, imagens do AVHRR ("Advanced Very High Resolution Radiometer") a bordo do NOAA, são obtidas diariamente no período vespertino. Esta maior frequência de observação resulta normalmente em uma série de imagens que fornecem pelo menos uma imagem livre de nuvens da maioria das áreas tropicais, durante a estação seca do ano (Malingreau e Tucker, 1988). Já o processamento destas imagens para obtenção do acréscimo anual de desmatamento como proposto nesta pesquisa, supondo-se que a metodologia esteja disponível e seja adequada, requer cerca de três semanas de trabalho para processar dez imagens em um SITIM/SGI/microcomputador, operado por apenas uma pessoa. Este custo, de aproximadamente dez mil dolares, a partir de imagens AVHRR/NOAA é portanto muito inferior e mais rápido em relação a trabalhos semelhantes com imagens TM/Landsat.

O manejo e o armazenamento da grande quantidade de dados disponíveis dos sistemas orbitais existentes é tarefa difícil. Um dos meios encontrados para reduzir este problema, otimizando a análise dos dados, é a utilização dos sistemas de informações geográficas - SIGs - que se desenvolveram da necessidade de se resolver problemas de manipulação e de apresentação de dados que podem ser geocodificados (Ehlers et al., 1989). A interação sensoriamento remoto - SIG, fornece meios para se efetuar um gerenciamento eficaz e efetivo de recursos naturais em larga escala.

O desenvolvimento e a implementação de um SIG para a Amazônia, alimentado por dados orbitais, facilitaria o processo de gerência e de controle da região. Esta

combinação seria de grande importância para aplicações práticas, visando a geração de um procedimento metodológico que possibilite a automatização da detecção da alteração da cobertura vegetal da Amazônia, utilizando de forma integrada um SIG na manipulação de imagens AVHRR/NOAA.

1.1 - Objetivos

a) Objetivo Geral

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de detecção e de acompanhamento de desmatamentos para a Amazônia, utilizando-se dados de sensoriamento remoto de alta frequência temporal e baixa resolução espacial do sensor AVHRR dos satélites meteorológicos da série NOAA, e o sistema de informações geográficas do INPE - SGI. A partir das informações obtidas com esta metodologia, visou-se tornar possível a produção de produtos que possam auxiliar o monitoramento e conservação da cobertura vegetal da Amazônia, com custo relativamente baixo.

b) Objetivos Específicos

- Desenvolver procedimentos e metodologia para detecção de mudanças na cobertura florestal amazônica, diretamente da banda 3 do sensor AVHRR, utilizando-se seqüências temporais de imagens;
- analisar implicações de diferenças radiométricas das imagens AVHRR/banda 3, em termos de classificação de florestas;
- verificar implicações da baixa resolução espacial do AVHRR quanto aos resultados finais de detecção de desmatamentos em comparação com dados TM de alta resolução;

- possibilitar a geração de cartas e outros produtos como dados de saída, com as informações de áreas potenciais de novos desmatamentos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A FLORESTA AMAZÔNICA E O DESMATAMENTO

Aqui pretende-se mostrar sucintamente a importância dos estudos relativos à prevenção dos desmatamentos. Uma análise detalhada desses problemas seria muito extensa, e estaria além do escopo do presente trabalho.

A Amazônia Legal possui a maior área remanescente de floresta tropical do mundo (The World Resource Institute, 1990), com cerca de 3.900.000 km² (INPE, 1992). As comunidades vegetal e animal da floresta tropical na Amazônia representam um depositário de inumeráveis espécies e linhas genéticas, de produtos naturais e interações ecológicas entre as suas espécies de grande potencial para usos agropastoris, comerciais, industriais, energéticos e medicinais, cuja ínfima parcela tem sido analisada e estudada (Rankin, 1979; Câmara, 1986).

Para Rankin (1979), a floresta tropical Amazônica é um ecossistema frágil. A comunidade em si mesma não é um recurso renovável, embora certos elementos da comunidade (madeiras de lei, por exemplo) possam ser renovados quando tratados sob sistemas adequados de manejo e sem pressão de uso intensivo.

Segundo Schubart (1983), apesar de suportar uma floresta tão exuberante, a maior parte dos solos da Amazônia são de baixa fertilidade. Conforme Schubart et al. (1984), a elevada eficiência na reciclagem de nutrientes minerais observada nas florestas tropicais tem sido cor-

relacionada com a alta diversidade biológica. Alta diversidade biológica significa a existência de um número correspondentemente alto de interrelações entre os organismos, resultando no aproveitamento máximo de qualquer excesso de material ou de recurso do ambiente. A reciclagem de nutrientes se contrapõe por sua vez à lixiviação dos solos, pois representa um mecanismo de conservação de nutrientes no ecossistema, mantendo o bom estado nutricional das plantas. Ainda segundo o autor, o conhecimento disponível permite concluir que a manipulação dos recursos florestais da Amazônia, no sentido de uma redução drástica da sua diversidade biológica, poderá ter consequências indesejáveis, tanto ecológicas quanto econômicas.

Conforme Paixão et al. (1986), a preocupação pelo tema "meio ambiente" tomou dimensão maior nos anos 70. Primeiramente isto ocorreu nos países desenvolvidos, em relação à contaminação e à destruição ou esgotamento dos recursos naturais. Posteriormente, esta preocupação estendeu-se aos demais países. Segundo os autores, há na forma de abordar o tema uma dicotomia entre a posição dos países industrializados e os países em via de desenvolvimento, embora em ambos o problema está centrado na contradição aparente meio-ambiente x desenvolvimento. Os primeiros países destacam a preservação e conservação dos recursos naturais, bem como a manutenção de níveis baixos de contaminação. Os segundos se orientam sob uma política que justifica o aproveitamento de recursos naturais para necessidades básicas da população.

A partir da Conferência de Estocolmo sobre o meio ambiente, realizada em 1972, quase todos os países incorporaram alguma legislação ambiental, e muitos incorporaram às suas constituições disposições para proteger o meio ambiente (Alho, 1986). De acordo com este autor, a legis-

lação federal sobre conservação dos recursos naturais no Brasil está representada principalmente pelo Código Florestal (Lei nº 4.771 de 15 de setembro de 1965). Contudo, decretos proibindo o desmatamento (como a Lei nº 7.511 de 7 de julho de 1986), têm efeito mínimo sobre aqueles que vivem distantes de estradas e cidades, e espalhados por uma região tão vasta como a Amazônia (Fearnside, 1989), ficando desta forma, muitos eventos no processo de desmatamento fora do controle do governo.

Qualquer política de desenvolvimento visando limitar efetivamente o desmatamento deve ser baseada no conhecimento de causas básicas, que vêm motivando este processo (Fearnside, 1979). O processo de desmatamento na Amazônia é influenciado por uma série de fatores. Basicamente, foi estimulado pelo governo, através de programas que atraíram novos migrantes de outras partes do país, juntamente com o estabelecimento de projetos de colonização e melhorias das estradas de acesso. A construção de grandes rodovias, como por exemplo, a Belém-Brasília, responsável pela criação de grandes núcleos de desmatamentos no sul do Pará e norte do Mato Grosso, e a Cuiabá-Porto Velho, que deu início a focos de desmatamento na região oeste da Amazônia, juntamente com incentivos fiscais, que visavam gerar e dinamizar as atividades agropecuárias, colocaram decisivamente em risco toda a fragilidade do ecossistema Amazônico (Ayres e Best, 1979; Fearnside, 1989).

Segundo Fearnside (1989), a implantação de pastagens contribui consideravelmente para a aceleração do desmatamento, tanto por pequenos colonizadores quanto por grandes latifundiários e especuladores. O desmatamento para implementação de pastagem é o método mais utilizado por posseiros e grileiros, pois a pastagem representa a forma mais fácil de ocupação de uma área extensa. Conforme o au-

tor, a comercialização de madeira, bem como a destruição em larga escala da floresta para produção de carvão vegetal e a extração de outros produtos derivados da floresta já estão se tornando uma fonte substancial de distúrbios.

Por que defender a floresta Amazônica e não a floresta do Japi de São Paulo, as de terra roxa do norte do Paraná, as de pau brasil do nordeste brasileiro ou a do Rio Doce de Minas Gerais? Segundo Kerr (1986), em primeiro lugar, porque a floresta Amazônica é a maior floresta tropical contínua do mundo e em segundo lugar, porque as outras não tiveram quem as defendesse e, por isso não existem mais. Além disso, para o autor, só existem quatro áreas de expansão para a humanidade: os oceanos, os desertos, a Antártica e a Amazônia.

Os riscos ecológicos associados com a derubada de grandes áreas de floresta são:

- 1) compactação e erosão do solo, e conseqüente perda de fertilidade, uma vez que o desmatamento interrompe o ciclo de nutrientes com o ecossistema (Schubart, 1983 e 1986; Câmara, 1986; Sioli, 1987);
- 2) assoreamento de igarapés e rios com o material resultante da erosão, com conseqüente ocorrência de enchentes (Schubart, 1986; Sioli, 1987);
- 3) redução da diversidade genética e extinção local de espécies, causando desequilíbrio populacional e riscos de proliferação de pragas, uma vez que um organismo cuja ação na floresta é limitada poderá tornar-se uma praga importante em ecossistemas simplificados artificialmente (Schubart, 1983, 1986; Alho, 1986; Câmara, 1986);

- 4) modificação do ciclo hidrológico, caracterizada pela redução da evapotranspiração real, aumento do escoamento superficial da água, provocando enchentes durante as chuvas e estiagens mais longas durante os meses secos (Schubart, 1986).

Segundo Salati (1983), 50% da precipitação da região Amazônica é proveniente da evapotranspiração da própria floresta. Através deste processo, a floresta aumenta o tempo de permanência da água no sistema, devolvendo para a atmosfera, na forma de vapor, parte da água presente no solo. Uma outra cobertura, cuja evapotranspiração não substitua a inicial da região, determinará menor disponibilidade de vapor na atmosfera, com conseqüente redução na precipitação, especialmente nos períodos mais secos. Deve-se esperar pois, que no caso da substituição de floresta por pastagens ou por culturas anuais em grande extensão da Bacia Amazônica, o clima sofra modificação no sentido de ter um período seco prolongado melhor definido, com um déficit de água no solo e maiores oscilações das temperaturas. Segundo o autor, uma redução da precipitação de 10 a 20% já seria suficiente para induzir profundas modificações no atual ecossistema. Haveria modificações sucessivas na flora e na fauna até ser atingido um novo equilíbrio ecológico.

Para Salati e Nobre (1991), dependendo da dimensão das alterações ocorridas, as conseqüências climáticas do desmatamento se estendem além do nível regional. Como Bunyard (1987) relatou, grande parte da água evaporada da floresta Amazônica é carregada pelos ventos em direção à latitudes mais altas. No processo, o calor latente é transmitido dos trópicos para latitudes mais altas, desta forma contribuindo significativamente para um clima mais equitativo em áreas temperadas. Assim, as florestas

tropicais úmidas do mundo, em particular a floresta Amazônica, podem ser consideradas como um componente vital no processo de extrair calor das regiões quentes do globo para as regiões mais frias. Em suma, a presença das florestas serve para moderar extremas variações climáticas globais, tipo precipitação e albedo. As florestas afetam o clima local, alteram o balanço energético da superfície devido à reflexão da luz solar e evaporação da água (The World Resource Institute, 1990; Gash e Shuttleworth, 1991).

Talvez a conexão mais importante entre clima e floresta seja o papel desta no ciclo global do carbono (The World Resource Institute, 1990). É importante ressaltar que embora a floresta Amazônica não seja uma fonte relevante de oxigênio, é um grande reservatório de carbono (Salati, 1983). Segundo Goldsmith et al. (1987), o desmatamento acrescenta dióxido de carbono na atmosfera, como resultado da queima de florestas e da decomposição da vegetação cortada e abandonada. De acordo com os autores, a elevação dos níveis de CO_2 provocaria aquecimento global através do efeito estufa, pois o CO_2 retém a energia solar que a terra re-emite para o espaço causando aumento na temperatura da superfície terrestre.

O aquecimento do planeta devido ao aumento de CO_2 na atmosfera seria causado por um fenômeno muito simples. De acordo com Salati (1983), a radiação solar composta principalmente de radiações de ondas curtas, atravessa a atmosfera sem grandes dificuldades, e praticamente sem dependência da concentração de CO_2 na atmosfera. No entanto, a radiação emitida pelo solo, que é aquecido pelos raios solares, é de comprimento de onda maior e é absorvida pelo CO_2 . Assim o aumento de CO_2 na atmosfera provocará uma alteração no equilíbrio de energia de forma a aumentar a fração retida pela atmosfera, aquecendo-a. Uma discussão

detalhada sobre estes problemas e sua relação com o clima pode ser encontrada por exemplo em Salati e Ribeiro (1979), Bunyard (1987), Molion (1989) e Nobre et al. (1991).

2.2 - DETECÇÃO DE DESMATAMENTO POR SENSORIAMENTO REMOTO

De acordo com Novo (1989), a base sobre a qual se assenta a aquisição de informações por sensoriamento remoto é a interação energia-matéria. O que chega ao sensor é a quantidade de energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos, que posteriormente é transformada em um sinal passível de ser interpretado. Segundo a autora, alvos na superfície terrestre podem ter sua resposta espectral alterada com o tempo em decorrência de fatores externos (iluminação, alterações antrópicas, etc.), ou de modificações próprias de sua natureza. Os alvos naturais mais sujeitos a modificações são os compostos por coberturas vegetais.

A detecção de desmatamentos ou de mudanças no uso original da terra (The World Resource Institute, 1990) por sensoriamento remoto utiliza comprimentos de onda específicos, sendo esses comprimentos de onda selecionados de forma a fornecer um forte sinal de contraste entre a vegetação e outros alvos.

2.2.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA COBERTURA VEGETAL

Os parágrafos a seguir baseiam-se em estudos de revisão realizados por Valeriano (1988), a não ser quando de outra forma especificado.

A cobertura vegetal pode ser compreendida como um conjunto de elementos estruturais como caules, raízes, folhas, etc., com quantidades e arranjo no espaço característico para cada vegetação. A radiação eletromagné-

tica refletida, emitida ou espalhada pela cobertura vegetal, leva consigo informação integrada dessas características estruturais, bem como de cada um de seus elementos.

Contudo, as folhas são os elementos que contribuem de forma mais significativa na resposta espectral, principalmente porque dentre as estruturas da planta são aquelas que interagem mais ativamente com a luz visível (Myers, 1983).

A radiação eletromagnética proveniente do sol pode sofrer um dos seguintes processos ao incidir sobre uma folha:

- a) ser refletida especularmente pela cutícula;
- b) penetrar no interior da folha de modo difuso a partir da primeira camada da célula e retornar pela mesma face na qual ocorreu a incidência;
- c) penetrar na folha e, também difusamente, atravessá-la e emergir pela face oposta;
- d) ser absorvida pela folha.

Segundo compilação do autor, a reflexão difusa da folha é o objeto de estudo principal do sensoria-mento remoto da vegetação, uma vez que esta radiação retornante sofre espalhamentos múltiplos no interior da célula, carregando consigo informações sobre a estrutura morfológica e o estado fisiológico da folha. Estes espalhamentos ocorrem como consequência das diferenças do índice de refração entre os espaços intercelulares com ar, células hidratadas e facetas irregulares do exterior da célula.

A razão entre a reflexão difusa, a transmissão difusa e a absorção, pela irradiância, resulta em índices denominados, respectivamente, reflectância, transmitância e absortância, e cuja soma se iguala à unidade. A reflectância é o parâmetro de interesse para o sensoriamento remoto dos recursos naturais, pois é característica do material observado.

A reflectância de um dossel vegetal e do solo na faixa de 400 nm a 2.500 nm, são ilustradas na Figura 2.1. As interações que ocorrem entre a radiação eletromagnética e a folha, ou seja, a curva espectral da folha, é resultante do somatório das respostas espectrais de elementos constituintes e fenômenos que ocorrem em sua estrutura interna.

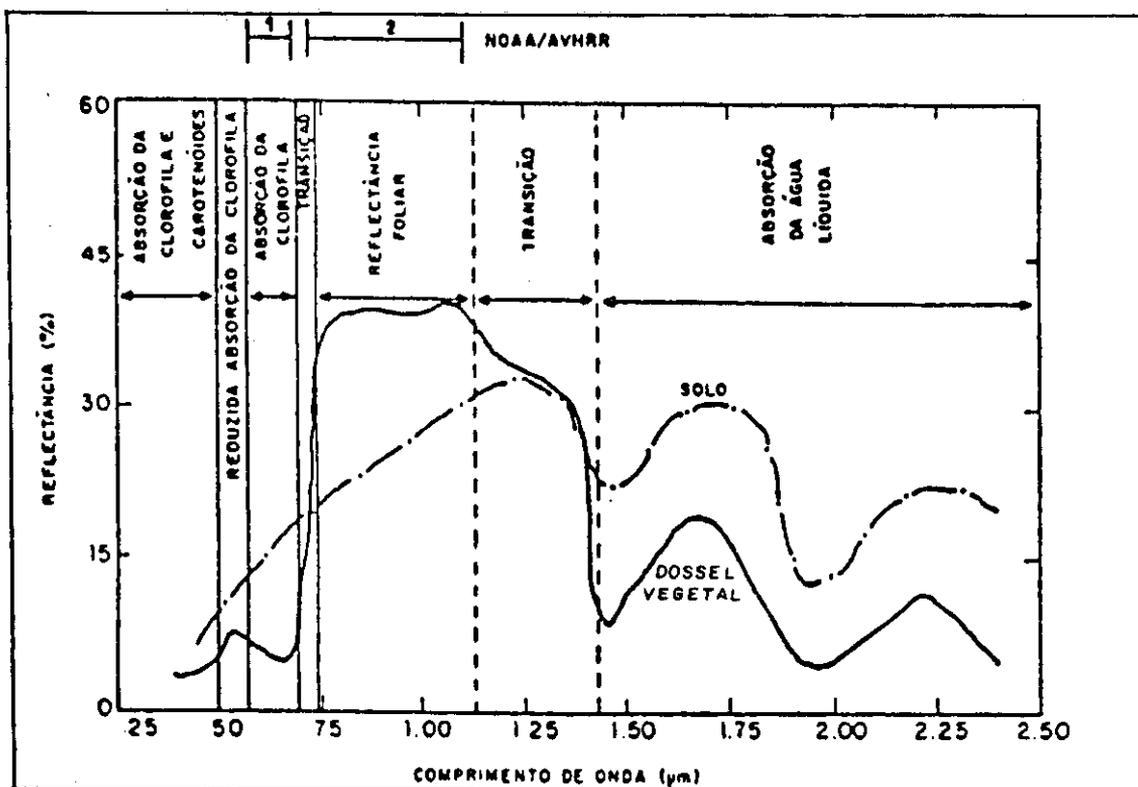


Fig. 2.1 - Curvas do comportamento espectral de um dossel vegetal e do solo.

FONTE: Adaptada de Tucker e Sellers (1986), p. 1.399.

Segundo Tucker e Sellers (1986), pode-se discriminar nas curvas da Figura 2.1 cinco regiões primárias e duas de transição, onde as diferenças nas propriedades ópticas da folha (espalhamento e absorção) e as propriedades ópticas do fundo ("background") controlam a reflectância espectral da cobertura vegetal. Estas regiões são ainda modificadas por diferenças na densidade de cobertura vegetal, ângulo zenital solar e ângulo de visada do sensor. Segundo os autores, as regiões são as seguintes:

- 1) 400nm a 500nm, onde ocorre absorção espectral por pigmentos, essencialmente clorofila e carotenos;
- 2) 500nm a 620nm, onde se verifica um reduzido nível de absorção pela clorofila;
- 3) 620nm a 700nm, onde ocorre forte absorção da energia eletromagnética pela clorofila;
- 4) 700nm a 740nm, região de transição onde cessa a forte absorção pela clorofila;
- 5) 740nm a 1100nm, onde se observa mínima absorção e os mecanismos de espalhamento das folhas resulta em altos níveis de reflectância espectral, especialmente para áreas de densa cobertura vegetal;
- 6) 1100nm a 1300nm, região de transição onde aumenta a absorção pela água líquida concentrada no tecido;
- 7) 1300nm a 2500nm, onde ocorre absorção pela água contida no tecido foliar, com fortes picos em 1450nm e 1950nm.

As interações que ocorrem entre a energia radiante e a planta na região do visível (400 nm a 700 nm), caracterizam-se por uma alta absorvência que consome cerca de 60% da irradiância. A eficiência na absorção é resultado do mecanismo de espalhamento múltiplo no interior da folha, que aumenta a extensão da trajetória da radiação e consequentemente, a probabilidade desta radiação ser interceptada por um pigmento. Na região do infravermelho próximo (700 nm a 1300 nm), observa-se o resultado do mecanismo de espalhamento múltiplo no interior da folha, uma vez que os pigmentos não absorvem a radiação eletromagnética nesta faixa espectral. A fração de energia retida na folha oscila em torno de 5 a 10% da energia incidente, e o restante é dividido entre a reflectância e a transmitância, em proporções que variam em função do tipo de estrutura do mesófilo, da sua espessura e do seu teor de água.

Mesófilos compactos favorecem a transmitância, uma vez que apresentam pouca superfície de contato entre o ar dos espaços intercelulares e as paredes celulares, o que resulta em uma menor frequência de mudança de trajetória da luz. Já os mesófilos dorsiventrals, ou aqueles com predominância do parênquima lacunoso, tendem a refletir mais do que transmitir a radiação incidente. Isto é decorrente do grande número de superfícies de contato célula-ar presentes no parênquima lacunoso. Estas superfícies estão dispostas de modo a prover o espalhamento múltiplo da radiação, o que implica em uma maior taxa de mudança de trajetória e, consequentemente, de energia retornante.

Na região do infravermelho médio (1300 nm a 3000 nm), a capacidade apresentada pela água em absorver a radiação eletromagnética favorece a detecção por sensoria-mento remoto, da condição de suprimento de água da vege-tação.

2.2.2 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESPOSTA ESPECTRAL DA COBERTURA VEGETAL OBTIDA POR SENSORES ORBITAIS

Em seu trabalho de revisão Valeriano (1988), citou que a radiação proveniente de uma cena observada pelo campo de visada instantâneo de um sensor é o somatório das contribuições dos alvos componentes da cena, muitas vezes de naturezas bastante diversas. Por exemplo, vários tipos de folhas, solo, troncos, áreas de sombra, flores, são alvos normalmente encontrados numa cena de vegetação. Suas importâncias variam em função do tipo de vegetação, predominando as folhas em formações florestais, ou o solo em vegetação esparsa, por exemplo.

Os dados espectrais obtidos a partir de satélites são também influenciados pela geometria variável sol-alvo-sensor e pela composição da atmosfera no momento da aquisição dos dados (Tucker e Sellers, 1986). Conforme esses autores, vários estudos realizados sobre os efeitos do ângulo zenital solar sobre a resposta espectral da cobertura vegetal demonstraram que a reflectância espectral da superfície nas bandas de 550 nm a 680 nm e de 730 nm a 1100 nm, proveniente da cobertura vegetal densa e homogênea para qualquer ângulo solar, tende a um valor mínimo próximo ao nadir do satélite e aumentam à medida em que se aumenta o ângulo de visada para todas as direções azimutais.

Para o caso onde a cobertura vegetal se apresenta de forma esparsa, as propriedades de espalhamento anisotrópico do solo influenciam significativamente a reflectância espectral direcional. Isto resulta do fato de que a reflectância direcional do solo tem uma forte característica de retroespalhamento que pode dominar a resposta espectral para coberturas vegetais esparsas sob ângulos solares mais baixos.

Holben (1986), cita que os constituintes atmosféricos afetam a radiação de retorno ao sensor através do espalhamento e/ou absorção. O espalhamento tanto pode aumentar ou diminuir a resposta espectral do alvo, enquanto a absorção apenas diminui o sinal de retorno. Segundo Szekiêlda (1988), como regra geral, a atenuação aumenta à medida que o comprimento de onda diminui. Conforme este autor, os constituintes atmosféricos que afetam os dados são as moléculas de água, que causam espalhamento tipo "Rayleigh", o oxigênio, ozônio, outros gases traço e o vapor d'água que causam absorção e aerossóis, que causam tanto o espalhamento quanto a absorção. A trajetória percorrida pela radiação através da atmosfera é de importância crucial, sendo mínimo o efeito atmosférico para visadas no nadir (Gutman, 1991).

A reflectância dos solos é influenciada por uma série de fatores, que atuam individualmente ou em associação uns com os outros. Em determinadas condições a influência de um parâmetro sobrepuja a dos outros, resultando em algumas feições específicas daquele parâmetro na curva de comportamento espectral daquele solo. De acordo com Stoner e Baumgardner (1980), os principais fatores nos solos são as propriedades físico-químicas, seu teor de matéria orgânica, granulometria, textura, mineralogia, conteúdo de óxidos de ferro e umidade. Conforme os autores, de maneira geral observa-se que a reflectância do solo na faixa de 400nm a 2500nm decresce com o aumento do teor de matéria orgânica. Os solos aparecem mais escuros quando úmidos, tendo como consequência uma diminuição da reflectância, sem alteração da forma geral da curva espectral (Bowers e Hanks, 1965).

Segundo Myers (1983), quando a densidade de vegetação aumenta até recobrir totalmente o solo, a contribuição deste será mínima para a reflectância espectral do dossel. Assim, a contribuição relativa do solo para a reflectância espectral do dossel é inversamente relacionada com a biomassa ou densidade de vegetação.

Conforme descrito no item 2.2.1, para estudos da vegetação por sensoriamento remoto, os dados de radiância espectral provenientes das faixas 400nm a 700nm, 740nm a 1100nm, e 1300nm a 2500nm inferem propriedades relacionadas à absorção por pigmentos, à densidade de folhas verdes projetada e ao conteúdo de água da cobertura vegetal. Contudo, a absorção por pigmentos está altamente correlacionada com o conteúdo de água da planta. Desta forma, duas regiões do espectro eletromagnético têm sido, normalmente, utilizadas na aplicação do sensoriamento remoto orbital para inferir propriedades biofísicas da cobertura vegetal. Essas duas regiões são equivalentes a porção do visível, que compreende o intervalo de 600 nm a 700 nm e do infravermelho próximo (750 nm a 1100 nm) (Tucker e Sellers, 1986).

Estas porções do espectro eletromagnético favorecem a distinção entre solo e vegetação. O fundamento disto é que, à medida em que a quantidade de vegetação verde aumenta, a reflectância na faixa espectral do vermelho diminui, enquanto que no infravermelho próximo há um aumento. Isto se deve ao fato da vegetação absorver a radiação vermelha e refletir o infravermelho. Também tem-se como fator, a cobertura do solo pelo fechamento das copas das plantas, diminuindo a reflectância na faixa do vermelho vinda do solo, que possui fortes constituintes espectrais nesta região.

Para a região do espectro correspondente ao infravermelho termal, pode-se ter a diferenciação entre vegetação e solo, uma vez que há maior aquecimento do solo do que da vegetação durante o dia (Myers, 1970).

Vários índices de vegetação foram propostos, baseados em razões e diferenças de bandas, principalmente referentes às do vermelho e infravermelho próximo (Lloyd, 1989). Várias combinações matemáticas dos canais 1 e 2 do AVHRR têm se mostrado indicadores bem sensíveis da presença de vegetação (Tarpley et al., 1984).

Conforme citado por Justice et al. (1985), o IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é uma razão que tem mostrado alta correlação com os parâmetros da vegetação, sendo de considerável valor para sua discriminação. O IVDN é definido por:

$$\text{IVDN} = (\text{IV} - \text{V}) / (\text{IV} + \text{V}) \quad (2.1)$$

Onde, "V" representa a medida espectral do canal visível da região do vermelho, correspondente ao canal 1 do AVHRR (580 nm a 680 nm) e "IV" representa a medida espectral da região do infravermelho próximo, correspondente ao canal 2 do AVHRR (725nm a 1100nm).

Ainda conforme os autores, a razão entre as bandas é de considerável uso na redução de variações devido a topografia do terreno e na compensação de variações na radiância, em função da elevação solar, principalmente para estudos realizados em escala continental.

Segundo Tarpley et al. (1984), nuvens, água e neve possuem reflectâncias mais altas no visível do que no infravermelho. Assim, para essas feições, o IVDN é negativo. Rochas e solo nu possuem reflectâncias similares nes-

sas duas bandas e resultam em índices de vegetação próximos a zero. Em cenas com vegetação, os altos valores deste índice são obtidos para áreas cobertas por vegetação verde e os valores mais baixos para áreas sem vegetação e para áreas cobertas por nuvens (Townshend e Justice, 1986).

Efeitos atmosféricos, tais como espalhamento por partículas e aerossóis, espalhamento de "Rayleigh" e nuvens menores que um pixel, contribuem para aumentar o valor da radiação registrada pela banda visível do AVHRR e reduzir o valor do índice de vegetação computado. A redução se torna maior para grandes ângulos de imageamento (Tarpley et al., 1984). Holben (1986), mostrou que esses efeitos podem ser minimizados com a composição de máximos valores de IVDN, formando-se mosaicos a partir de uma série de imagens multi-temporais georeferenciadas. O valor de cada pixel é analisado e somente os de maior valor são utilizados.

2.3 - O SISTEMA SENSOR AVHRR/NOAA

Foram lançados sete satélites da série NOAA, carregando o "Advanced Very High Resolution Radiometer" (AVHRR) (Sader et al., 1990). O primeiro, o NOAA 6 foi lançado em junho de 1979, e o mais recente, o NOAA 12 em maio de 1991.

Os satélites foram desenvolvidos para operar em órbita quase polar, sol-síncrona, com uma inclinação de $98^{\circ},89$ a uma altitude nominal de 833 km (Kidwell, 1991). O período orbital é de aproximadamente 102 minutos, resultando em 14,1 órbitas por dia (Kidwell, 1991).

Os satélites atuam em par, ou seja, dois satélites operacionais fornecem um total de no mínimo quatro passagens por dia para qualquer lugar em latitudes equato-

riais. Eles garantem desta forma a cobertura de uma mesma região a cada 6 horas, considerando-se as passagens onde a cena se encontra nas bordas da imagem. Os satélites em operação atualmente são o NOAA 11 e o NOAA 12, lançados para substituir os satélites NOAA 9 e 10 respectivamente, e que por sua vez ainda apresentam condições operacionais.

A restrição das visadas "off-nadir" reduzem a resolução temporal, mas numa proporção que varia com a latitude. Goward et al. (1991), sugere que o limite de visada off-nadir seja de $\pm 25^{\circ}$, uma vez que acima deste valor as distorções se tornam muito grandes. Ainda segundo os autores, devido as interações entre a geometria orbital e de visada, a frequência temporal de repetição aumenta com a latitude.

A Tabela 2.1 resume as principais características orbitais e de imageamento do sistema sensor AVHRR~NOAA.

O IFOV ("Instantaneous Field of View") do sensor é de aproximadamente 1,4 mrad, sendo que para uma altitude nominal de 833 km, tem-se uma resolução espacial de 1,1 km no nadir (Kidwell, 1991). Embora o IFOV seja constante, a resolução varia de 1,1 km x 1,1 Km no nadir para 2,4 km x 6,9 km, na máxima posição fora do nadir.

A varredura transversal é feita por incrementos do IFOV, a uma taxa de amostragem de 0,95 mrad, o que proporciona uma sobreposição de 27% entre os pixels, perfazendo 2048 amostras por linha, cobrindo um ângulo de aproximadamente $+55^{\circ},4$ a $-55^{\circ},4$ (FOV), o que fornece uma faixa no terreno de 2700 km de largura (Schwalb, 1982; Kidwell, 1991), proporcionando assim uma visão sinóptica da Terra.

TABELA 2.1 - CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS AVHRR/NOAA

Ciclo de cobertura	9 dias				
Ângulo de varredura	+ 55 ^o ,4 a - 55 ^o ,4				
Cobertura no solo	2700 km				
Inclinação orbital	98 ^o ,89				
Período orbital	102 minutos				
Nº de órbitas/dia	14,1				
Altitude nominal	833 km				
IFOV	1,39 - 1,51 mrad				
Resolução no solo	1,1 km (nadir) - 2,4 km x 6,9 km (máxima posição fora do nadir)				
Quantização	10 bits				
Cruzamento equatorial	<u>descendente</u>		<u>ascendente</u>		
no lançamento	07:30 h		19:30 h	(NOAA 10 e 12)	
	02:20 h		14:20 h	(NOAA 09 e 11)	
Bandas espectrais	1	2	3	4	5
Faixas espectrais (nm)	580	725	3.550	10.300	11.500
	a	a	a	a	a
	680	1.100	3.930	11.300	12.500

FONTE: Adaptada de Justice et al. (1985), p. 1273, e Kidwell (1991).

As funções de cada canal são dadas a seguir, conforme Pereira (1987), baseado em Schneider et al. (1981), e Barnes e Smallwood (1982):

canal 1: detecta comprimentos de onda na faixa do visível, ou seja, luz refletida. Mede albedo, define feições na neve, gelo, solo, cobertura vegetal (absorção da radiação pela clorofila, relacionada a atividade fotossintética) e atributos meteorológicos (nuvens);

canal 2: detecta comprimentos de onda na faixa do infravermelho próximo. Permite delinear superfície de água, avaliar vegetação (reflexões múltiplas, devido a estrutura interna da folha) e cobertura de nuvens. Em conjunto com o canal 1, é possível se inferir propriedades biofísicas à cobertura vegetal, bem como avaliar a densidade de fitomassa presente (Tucker e Sellers, 1986);

canal 3: detecta comprimentos de onda na faixa do infravermelho termal (médio), é sensível as fontes de calor, permitindo a detecção de pontos quentes (queimadas), áreas desmatadas (o desmatamento provoca alterações no balanço local de radiação, tornando o solo e as camadas de ar mais quentes e com reflectância e emitância maior que a porção coberta pela floresta (Malingreau e Tucker, 1987), análise da temperatura da superfície do mar e mapeamento noturno de nuvens;

canal 4 e 5: detectam comprimentos de onda na faixa do infravermelho termal, possibilitando a obtenção de temperaturas diurnas e noturnas, detecção de erupção vulcânica, mapeamento de nuvens e avaliação da temperatura de lagos, rios e oceanos e umidade do solo.

Segundo Kidwell (1991), os dados AVHRR são transmitidos continuamente para a superfície terrestre de forma direta em tempo real. Este modelo de operação normal do satélite é chamado HRPT ("High Resolution Picture Transmission").

Os dados de qualquer porção da superfície terrestre também podem ser gravados a bordo do satélite, para posterior transmissão, conforme selecionado pela NOAA-NESDIS ("National Environmental Satellite, Data and Information Service"), constituindo os dados LAC ("Local Area Coverage"), permitindo obter-se informações de áreas desprovidas de estação receptora de imagens. Os dados HRPT e LAC possuem as mesmas características, com resolução de 1,1 km.

Os dados são processados a bordo do satélite, constituindo os dados GAC ("Global Area Coverage"). O processador faz uma amostragem dos dados, obtidos em tempo real, produzindo pixels com representatividade espacial de cerca de 5 km x 4 km, a partir dos pixels de 1,1 km.

Desde 1982 os produtos GAC subamostrados são utilizados para produzir um terceiro produto chamado GVI ("Global Vegetation Index"), com representatividade de 20 Km, que contribui para estudos da vegetação a nível global (Justice et al., 1985; Holben, 1986; Gutman, 1991).

De maneira geral, a cobertura de toda a superfície terrestre pelo AVHRR em base diária é bem adequada para estudos da dinâmica da vegetação. Aspectos que ficam sacrificados com o uso do AVHRR no domínio espacial são compensados no domínio temporal (Murphy, 1986).

2.3.1 - O AVHRR NA AVALIAÇÃO DE ALTERAÇÕES NA COBERTURA VEGETAL DA AMAZÔNIA

De acordo com Sader et al. (1990), durante os primeiros anos após o lançamento do NOAA-6, houve pouco uso do AVHRR no mapeamento da vegetação, uma vez que se considerava sua resolução baixa para a maioria das aplicações. Contudo, após alguns trabalhos pioneiros realizados

por cientistas interessados no monitoramento de culturas e no mapeamento global da vegetação, as vantagens dos dados do AVHRR tornaram-se evidentes. Para os autores, dentre as vantagens está, em primeiro lugar, o relativo baixo custo da aquisição dos dados e da análise de extensas áreas cobertas, quando comparado a sensores de resolução mais fina. Também a cobertura diária, aumenta a probabilidade de se obter dados livres da cobertura de nuvens, seja por meio de imagens individuais selecionadas ou através da composição multi-temporal de imagens.

A composição de imagens é um procedimento em que grupos de dados geograficamente registrados, coletados em um período seqüencial no tempo são comparados e o máximo ou mínimo de uma medida (ex: IVDN, temperatura, brilho) é selecionado para representar as condições observadas durante um período de tempo (Goward et al., 1991). Desta forma, é possível com este procedimento a seleção de observações livres da contaminação de nuvens e coletadas próximas ao nadir (Holben, 1986).

Estudos detalhados sobre a vegetação excedem a capacidade dos dados AVHRR, e por isso, os dados são mais apropriados para análise de grandes áreas, como é o caso da Amazônia, tendo em vista sua dimensão e a extensão de áreas cobertas por vegetação que rapidamente são transformadas por processos de desmatamento.

Vários trabalhos relativos a utilização do AVHRR no monitoramento da cobertura vegetal foram publicados. Há uma extensa revisão bibliográfica sobre o assunto. Um breve histórico pode ser encontrado em Hayes (1985), Sader et al. (1990) e em Cihlar et al. (1991).

Vários estudos sobre o desmatamento tropical utilizando dados AVHRR foram conduzidos na Amazônia Legal brasileira. Nelson e Holben (1986), utilizaram dados MSS/Landsat, LAC e GAC/NOAA e GOES/VISSR para a identificação de fontes de dados derivados de satélites apropriados para o monitoramento de desmatamentos em escala continental e sub-continental. Para tanto, estimaram a extensão dos desmatamentos em Rondônia. Os dados do MSS foram considerados como dados de referência. Os dados foram processados através de dois procedimentos de classificação diferentes. O primeiro procedimento utilizou o classificador MAXVER (Máxima Verossimilhança), onde discriminou-se floresta primária de área desmatada. O segundo procedimento consistiu na geração do IVDN para delimitamento de áreas de floresta e não-floresta.

De acordo com os resultados, os dados LAC classificados com o MAXVER mostraram-se os mais indicados para distinção entre as classes de floresta e áreas desmatadas. Já o uso do IVDN não foi tão eficiente para a diferenciação entre áreas de floresta e não-floresta, com a utilização dos dados LAC. A resolução espacial dos dados GAC não foi suficiente para delimitar desmatamentos lineares, e os dados GOES apresentaram muito ruído para serem eficientes na discriminação entre floresta e não floresta.

Woodwell et al. (1987), estimaram o desmatamento no estado de Rondônia para o ano de 1982, utilizando-se de uma combinação do MSS (banda 5 e banda 7) e AVHRR (banda 3). Os dados do Landsat foram classificados em floresta e não-floresta e comparados com os dados do AVHRR. Para esta estimativa com o AVHRR, foi feita uma análise dos pixels, onde definiu-se como área desmatada o pixel com valor radiométrico acima de um desvio padrão da média para banda 3. Esta abordagem baseia-se no fato de áreas desmata-

das serem mais aquecidas que as áreas de florestas intactas.

Com os dados obtidos, determinou-se que cerca de 11.400 km² do estado de Rondônia havia sido desmatado até 1982. Para comparação os autores utilizaram dados de fotointerpretação das imagens AVHRR realizada por métodos tradicionais não mencionados no texto, onde foi estimado 12.400 km² de área desmatada. Tucker et al. (1984), haviam estimado para o ano de 1982, diretamente de dados AVHRR classificados, de 9.200 km² a 11.000 km² de área desmatada nesta mesma região.

Malingreau e Tucker (1987), mostraram que os dados provenientes do NOAA/AVHRR, com resolução de 1,1 km, ofereceram várias vantagens para o levantamento de transformações em grande escala em florestas tropicais. Para tanto, foram coletados dados do sul da Bacia Amazônica, incluindo os estados do Acre, Rondônia e Mato Grosso, durante as estações secas de 1984 e 1985. Para determinação da extensão dos desmatamentos, selecionaram as melhores imagens dos anos em estudo, ou seja, imagens com os menores índices de cobertura de nuvens. Foi feita uma classificação por definição de limiares para a banda 3 (assumindo-se que os pixels saturados representam a presença de fogo no campo de visada do sensor). Foram analisados os valores radiométricos (temperatura de brilho) nos histogramas das imagens e classificou-se então as áreas de floresta e não floresta, que puderam ser confirmadas através de consultas a mapas de vegetação da área, imagens Landsat e outras fontes. Também foi gerado o IVDN, e observou-se uma boa correspondência entre áreas com altos valores para o índice, áreas cobertas pela floresta e pixels de baixa temperatura, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Os autores concluíram que os valores de áreas desmatadas podem ser subestimados, devido ao fato de que pequenos desmatamentos são mais difíceis de serem discriminados, tendo em vista o pixel ser de 1,1 km. Para o caso de queimadas, observou-se uma super estimação da área alterada. Contudo, a abordagem geral apresentou valores aceitáveis para estimativa de áreas desmatadas, com os dados AVHRR, quando comparados com os dados TM e dados de campo.

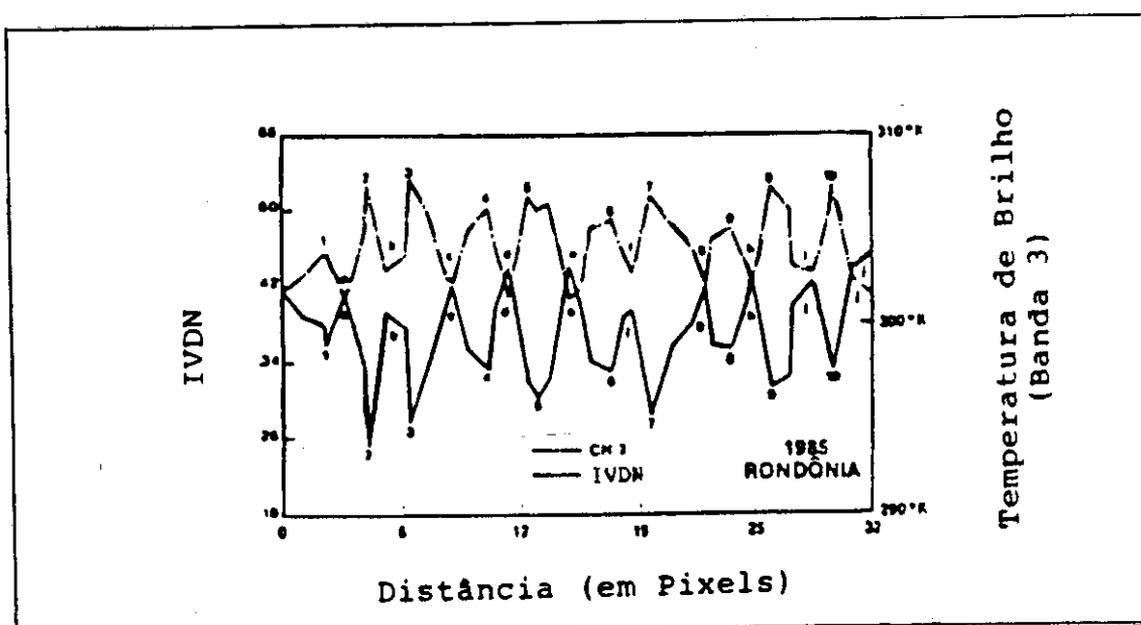


Fig. 2.2 - Perfil da correspondência inversa entre o IVDN e a temperatura da superfície em uma área próxima a cidade de Arquimedes (RO).

FONTE: Malingreau e Tucker (1987).

2.4 - O SISTEMA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

A imagem digital é um registro numérico associado à radiância de alvos, ou seja, o sinal produzido pelo sensor é transformado em dados numéricos que são tratados através dos sistemas de processamento de imagens digitais (Mascarenhas e Velasco, 1989). Sistemas de proces-

samento de imagens são programas computacionais que se destinam ao armazenamento e à manipulação de imagens. Esta última tem por finalidade extrair ou ressaltar as informações contidas nas imagens e/ou relacioná-las com outras fontes de dados (Velasco e Lima, 1982).

De acordo com Schowengerdt (1983) e Novo (1989), as técnicas de processamento de imagens ou a manipulação numérica de imagens digitais podem ser classificadas em três conjuntos: de pré-processamento, ou seja, técnicas que se referem ao conjunto de programas que permitem a transformação de dados digitais brutos em dados corrigidos radiométrica e geometricamente, incluindo a correção dos efeitos atmosféricos; técnicas de realce, que visam melhorar a qualidade visual da imagem, ou seja, consistem em obter as melhores condições de contraste dos níveis de cinza de acordo com a finalidade de aplicação; e técnicas de classificação, que consistem no reconhecimento automático de objetos da cena a partir da análise quantitativa dos níveis de cinza.

2.4.1 - O SITIM

Os sensores a bordo de satélites meteorológicos (imagens de baixa resolução espacial) e de recursos naturais (imagens de alta resolução espacial), geram uma grande quantidade de dados. Muitos estudos em sensoriamento remoto pressupõem a integração das informações oriundas das imagens com aquelas provenientes de levantamentos de campo, cartas topográficas e mapas temáticos. O ambiente típico para integração desses dados, reúne um sistema de tratamento de imagens e um SIG (Ii et al., 1990).

O SITIM (Sistema Interativo de Tratamento de Imagens) do INPE é um sistema orientado para o tratamento

de imagens multi-espectrais (INPE, 1986). O ambiente operacional utilizado é o MS-DOS. Utilizando como equipamento de base o SITIM, são desenvolvidos o Sistema de Processamento Digital de Imagens (também designado por SITIM) e o Sistema de Informações Geográficas (Souza et al., 1990).

O sistema SITIM-340 possui as seguintes características (ENGESPAÇO, s.d.):

- utilização de até quatro planos de imagem de 1024x1024 pontos (pixels) de 8 bits;
- visualização da imagem através de uma janela de 1024x768 pontos. A janela pode ser deslocada sobre a imagem (vão) utilizando um fator de ampliação qualquer (zoom);
- geração de cores verdadeiras, utilizando um plano de imagem para cada cor primária (R, G, B) ou cores falsas, utilizando um único plano de imagem;
- realce de imagens, utilizando tabelas independentes para cada cor primária, implantadas no "hardware";
- utilização de um plano gráfico que pode ser visualizado independentemente, ou sobreposto a imagem;
- conexão de múltiplas estações através de rede local.

Através do SITIM pode-se manipular imagens de dois tipos: imagens de satélites e imagens temáticas. As primeiras são obtidas por satélites como o Landsat, SPOT, NOAA e GOES, e as temáticas podem ser geradas de duas formas: classificação de imagens de satélites ou geração pelo SIG (INPE, 1989).

O SITIM dispõe de um conjunto de programas de aplicação orientados para o sensoriamento remoto denominado SSR (Sistema de Sensoriamento Remoto). Os aplicativos são dirigidos por "menu" e incluem funções de pré-processamento como obtenção de imagens a partir de operações aritméticas e lógicas, detecção de bordas, realce de contraste, filtragem espacial e registro, funções de classificação como a classificação por célula única (paralelepípedo), fatiamento, classificação por máxima verossimilhança (MAXVER) e distância euclidiana ("cluster") (ENGESPAÇO, s.d.).

2.4.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Segundo Novo (1989), as técnicas de classificação digital implicam na implementação de um processo de decisão, onde o computador atribui uma determinada classe a um certo conjunto de pontos da imagem. Conforme a autora, as técnicas de classificação multi-espectral podem ser divididas em três grupos: técnicas de classificação supervisionada, de classificação não supervisionada e de classificação híbrida.

Na classificação supervisionada, o sistema determina, a partir de padrões pré-selecionados, as características das classes a serem utilizadas como termo de comparação para a classificação (Dutra et al., 1981). Neste caso, é necessário o conhecimento prévio da cena para treinamento de amostras que representam o comportamento médio das classes que deverão ser mapeadas automaticamente (Novo, 1989). Os métodos do paralelepípedo (ou classificação por célula única) e de classificação por máxima verossimilhança são exemplos de classificações supervisionadas.

O algoritmo de classificação por célula única, é do tipo determinístico, ou seja, supõe-se que o comportamento dos atributos das classes não seja aleatório e possa ser descrito por funções que assumem valores bem definidos de acordo com a classe (Dutra et al., 1981). Este classificador é muito simples, e em princípio, "treinado" a partir da inspeção dos histogramas dos componentes das amostras de treinamento (Richards, 1986). Conforme este autor, os limites significantes de máximos e mínimos nos histogramas são identificados e utilizados para descrever a variação ("range") de valor de brilho para cada componente característico daquela classe. As variações de todos os componentes descrevem um paralelepípedo multi-dimensional. Se na classificação, determinados pixels são considerados como pertencentes a um determinado paralelepípedo, receberão a classificação correspondente àquele paralelepípedo.

Técnicas de classificação também podem ser aplicadas apenas a um canal espectral, sendo neste caso denominadas classificações unidimensionais. O fatiamento ou "slice", é uma das técnicas de classificação do tipo determinístico supervisionada unidimensional mais simples. Esta técnica consiste na divisão do intervalo total de níveis de cinza de uma dada faixa espectral, em um certo número de classes. Os algoritmos de fatiamento existentes partem, geralmente, da aquisição de um histograma do canal a ser utilizado para a classificação. Com base neste histograma são criados intervalos de níveis de cinza a partir de certos critérios. Aos pixels correspondentes a um certo intervalo de nível de cinza é atribuído uma determinada legenda, correspondente a uma dada classe temática (Novo, 1989).

De acordo com Dutra et al. (1981), o classificador MAXVER é um algoritmo de classificação tipo estatístico, ou seja, supõe que os atributos dos objetos sejam

considerados como tendo um comportamento aleatório (descrito por funções de distribuição de probabilidade). É associado a cada padrão uma probabilidade do mesmo pertencer a cada uma das classes pré-definidas na fase de treinamento, ou seja, são obtidas funções de distribuição de probabilidade e densidade definidas pelo classificador, para cada objeto, baseado na regra de decisão por máxima verossimilhança (Lillesand e Kiefer, 1979). Segundo Dutra et al. (1981), a regra consiste em associar o padrão à classe para a qual ele tenha maior probabilidade de pertencer, tendo em vista suas características ou atributos. As características das classes também são adquiridas no treinamento. Conforme estes autores, esse processo minimiza a probabilidade de erros, ou seja, a probabilidade de que um padrão seja associado a uma classe que realmente não pertença. Costuma-se introduzir um limiar para a probabilidade de um ponto da imagem pertencer a uma classe, abaixo do qual o ponto não pode ser considerado daquela classe.

Na classificação não supervisionada, o classificador age procurando dividir os dados segundo certas afinidades que um grupo de características desses mesmos dados possam ter entre si, não necessitando de uma fase de treinamento. A diferença básica deste procedimento para as técnicas de classificação supervisionada é o fato de as classes, ou grupos, não serem definidos pelo analista, e sim pelo algoritmo de agregamento, com base nas propriedades intrínsecas do conjunto de dados (Dutra et al., 1981).

Conforme Novo (1989), nas classificações não supervisionadas, quanto maior a heterogeneidade das amostras maior a certeza de que todas as classes existentes estarão representadas. A determinação dos grupos pode ser feita de diversas maneiras, sendo a mais comum através das medidas de distância no espaço multi-espectral. Mais

frequentemente encontrada como critério agrupador é a distância euclidiana entre os pixels no espaço de atributos espectrais (Richards, 1986; Novo, 1989). A partir de centros iniciais de possíveis classes, o programa reagrupa os pixels em iterações sucessivas, até que o centro do "cluster" seja mantido constante ou até que se atinja o número de iterações previstas pelo programa (Novo, 1989).

As classificações híbridas são aquelas em que o analista utiliza uma classificação não supervisionada como base para a seleção de amostras de treinamento para realizar uma classificação supervisionada (Novo, 1989).

2.4.2.1 - INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA CLASSIFICAÇÃO

Na classificação digital de imagens, as classes são formadas por elementos de cena (área da cena correspondente a um pixel). O problema da classificação digital consiste em, dadas várias classes e um elemento de cena suposto pertencer a uma delas, decidir a qual destas classes o elemento pertence (Andrade, 1990).

A resolução espacial é uma das principais características da imagem de sensoriamento remoto, uma vez que define o menor tamanho da área na superfície imageada da qual as medidas que compõem a imagem são derivadas (Townshend, 1980). Essas medidas são resultado da integração de respostas espectrais dos objetos que compõem cada pixel.

De acordo com Sadowski et al. (1977), a melhor resolução para classificação de feições de interesse depende do nível de informação desejado e da técnica de processamento empregada para fornecer a informação. Markham e Townshend, (1981), em seus estudos sobre o efeito da resolução espacial na precisão da classificação, concluíram

que dois fatores afetam o desempenho da classificação. O primeiro fator é a influência dos pixels de borda, uma vez que esses pixels representam objetos pertencentes a mais de uma classe (pixels misturados). À medida em que a resolução se torna mais fina, a proporção de pixels misturados diminui, resultando em uma classificação mais precisa. A classificação errada de pixels misturados se torna mais grave quando os pixels tendem a ser atribuídos a uma classe não contida dentro deles.

O segundo fator é relativo ao aumento da variação espectral dos tipos de cobertura terrestre associados a resoluções mais finas (frequentemente chamado de "ruído de cena"), tendo em vista a caracterização da cena se tornar mais complexa. Isto pode ser explicado devido a variações espectrais sutis da composição dos elementos de cena. O aumento da variabilidade espectral de uma classe faz com que esta ocupe maior área no espaço de atributos, resultando em uma maior sobreposição de classes. O aumento da sobreposição de classes implica em um aumento na probabilidade de erro na classificação, diminuindo o desempenho do classificador. À medida que a resolução é degradada, espera-se melhor qualidade na classificação, pois as variações da distribuição espectral ocupada no espaço de atributos das classes vão diminuindo.

Ainda segundo os mesmos autores, para uma dada cena, as variações no resultado da classificação, em função da resolução espacial, depende da importância relativa do "ruído de cena" e dos pixels misturados. Por exemplo, uma cena com pequenos talhões uniformes deve apresentar uma melhora na classificação à medida que a resolução aumentar. Alternativamente, uma imagem com grandes talhões heterogêneos deverá apresentar resultado oposto.

Conforme Andrade (1990) relatou, ao analisar as conseqüências do aumento da resolução na qualidade de classificação de um determinado tipo de cobertura de solo, é necessário levar em conta a posição deste em relação aos demais no espaço de atributos. Categorias que, a baixas resoluções, se apresentam próximas no espaço de atributos, terão qualidade de classificação piorada com o aumento da resolução. No entanto, categorias que possuem boa separabilidade entre si poderão obter resultados de classificação melhorados com resoluções mais altas devido a redução dos pixels misturados. Segundo a autora, no caso de classificação de imagens de florestas ou de áreas urbanas, é esperado um decréscimo na qualidade de classificação com o aumento da resolução. Isto é devido à estrutura espacial complexa dessas cenas, pois elas são compostas por vários tipos de objetos. Nas imagens com resolução mais alta, mais tipos de objetos presentes na cena poderão ser distinguidos na imagem.

Ainda segundo a autora, no caso do classificador de máxima verossimilhança, geralmente supõe-se que as classes possuem distribuição de probabilidade gaussiana ou normal, e portanto unimodal. Com a presença de detalhes na imagem, o que pode ocorrer é que mais de um tipo de pixel se torne bem frequente, ocasionando uma classificação multi-modal. Como os algoritmos de classificação não prevêem esta hipótese, a média estimada poderá estar fora da realidade, pois poderá localizar-se entre dois valores de ocorrência.

Os efeitos da alteração da resolução no desempenho da classificação de um determinado tipo de ocupação do solo é uma tarefa complexa. Além dos fatores citados anteriormente, muitas são as variáveis que deverão ser consideradas em cada caso. Para Markham e Townshend (1981),

entre outras variáveis, os efeitos dos pixels misturados e do "ruído de cena" podem exatamente se anular, quando a resolução é variada, de forma que o desempenho de classificação pode permanecer inalterado em uma larga faixa de resolução espacial.

Amaral (1992), em estudo sobre a utilização de imagens AVHRR para estimativas de desmatamentos em floresta tropical, encontrou uma subestimativa de 6% para floresta com um coeficiente de determinação (R^2) da ordem de 0,93 e correlação de 0,96, quando comparado aos dados de imagens TM (bandas 3-4-5) interpretadas visualmente, para uma região no estado do Mato Grosso. Para tanto a autora utilizou a banda 3 da imagem AVHRR com pixel de 2 km de resolução, classificada por fatiamento. Para o estudo com a imagem AVHRR utilizando a composição das bandas 1-2-3-IVDN, classificada pelo MAXVER, foi obtida uma superestimativa de 5% para floresta, com $R^2 = 0,94$ e correlação de 0,97.

A autora ressaltou a importância de se levar em consideração diferenças entre padrões de desmatamento, diferenças de bandas e do classificador utilizado, e diferença na abordagem de comparação com os dados Landsat. Contudo, os resultados obtidos foram bastante significativos quando comparados com a literatura em trabalhos correlatos. Por exemplo, Santos et al. (1991), encontraram $R^2 = 0,63$, com subestimativa de desmatamento pela imagem AVHRR (composição das bandas 1-2-3) em relação aos dados TM (composição 3-4-5).

2.5 - O SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Um sistema de informações geográficas (SIG) é uma tecnologia baseada em computador, caracterizada por "hardware" e "software" específicos (Jordan e Erdle, 1989),

com habilidade para aquisição, armazenamento, recuperação, transformação e saída de dados geo-referenciados. Estes dados descrevem os objetos em termos de posicionamento real, com relação ao sistema de coordenadas de seus atributos e das relações topológicas existentes (Burrough, 1987).

O sistema permite a combinação de dados de diversas fontes através de algoritmos de manipulação, possibilitando a geração de novos tipos de informações, bem como a integração das informações representando vários aspectos do estudo de uma região, como por exemplo, a altimetria, o uso do solo, rede de drenagem entre outras, numa única base de dados (Alves et al., 1988).

Os parágrafos a seguir baseiam-se em Erthal et al. (1988a e b), e Alves (1990).

O aplicativo que compõe um SIG consiste de alguns módulos técnicos básicos com as principais funções do sistema. Esses módulos são de interação, de entrada, de conversão, de manipulação, de gerenciamento e de saída.

O módulo de interação é responsável pela comunicação com o usuário, a qual se realiza através de um sistema do tipo menu, ou seja, procede via comandos dirigidos. O usuário tem acesso ao módulo de interação através de um terminal e escolhe o tipo de processamento a ser realizado pela seleção de uma seqüência de opções disponíveis em telas formatadas.

O módulo de entrada é responsável pela aquisição dos diversos tipos de informações espaciais fornecidas pelo usuário, bem como sua incorporação à base de dados. O conjunto de procedimentos utilizados no módulo de entrada depende do formato original em que estão armazenados os dados espaciais (mapas, imagens digitais e tabelas).

Cada formato de entrada está associado a um determinado periférico. As operações de entrada incluem entre outras, a digitalização (entrada via mesa digitalizadora), e edição (correção de eventuais erros produzidos na fase de digitalização).

O módulo de conversão permite realizar transformações entre formatos de dados, resoluções e no sistemas de projeção cartográfica.

O módulo de manipulação permite ao usuário obter novas informações a partir do inter-relacionamento entre os dados espaciais disponíveis. O procedimento consiste na geração de novos planos de informação (PI), a partir de operações de combinação entre um ou mais PIs.

Dentre as operações de manipulação comumente existentes nos SIGs estão as seguintes:

- reclassificação: operação que permite definir um novo PI pela união de classes de um PI existente na base de dados;
- sobreposição: operação lógica que permite a geração de um novo PI a partir da combinação das classes de 2 planos existentes;
- cruzamento: operação que permite cruzamento de vários PIs através das combinações lógicas "E" e "NÃO" entre classes, para obtenção de um novo plano que contenha informações que expressem o resultado da combinação dos PIs de interesse;
- área: operação que realiza cálculo de áreas para todas as classes de um dado PI, ou seja, é calculada a área ocupada pelos pixels ou células de um determinado valor.

O módulo de gerenciamento é responsável pelo armazenamento e pela recuperação das informações da base de dados e do diretório dos PIs. A este módulo estão associados um conjunto de rotinas que têm a finalidade de executar as seguintes operações:

- operações em arquivos: abertura, fechamento, criação, remoção e ampliação;
- operações em registros de arquivos: leitura, armazenamento e deleção.

Estas rotinas são, em geral, solicitadas dentro dos módulos de entrada, manipulação e saída, sempre que há necessidade de comunicação com a base de dados ou com o diretório dos PIs.

O módulo de saída é responsável pela geração dos produtos do sistema, em formato utilizável pelo usuário (relatórios, mapas, produtos fotográficos, dados estatísticos) ou num formato capaz de ser compreendido por outro computador (dados para outros sistemas como fitas magnéticas).

A abordagem a seguir baseia-se em Erthal et al. (1988a, b), Alves et al., (1988), (INPE, 1989), Alves (1990), Felgueiras et al. (1990), e Souza et al. (1990).

O trabalho de um usuário do SIG é organizado em projetos, que são as unidades básicas do sistema. Cada projeto corresponde a análise sobre uma região. A cada projeto corresponde um referencial geográfico distinto, que pode utilizar uma projeção cartográfica, localizações geodésicas, ou um outro referencial geográfico escolhido pelo usuário.

Um projeto é formado por PIs. Um PI reúne todas as informações que se referem a um certo aspecto do modelo de uma região. Por exemplo, em um projeto que reúna informações sobre altimetria, uso do solo e hidrografia, cada uma dessas características é organizada dentro de um PI independente.

Os autores citam ainda que os PIs são agrupados em categorias, conforme a natureza da informação geográfica, e cada PI armazena informações de uma única categoria, porém a mesma informação pode ser representada de várias formas. Uma categoria é definida pelo conjunto de dados espaciais que são representados e tratados pelo sistema da mesma maneira, como por exemplo, dados poligonais, modelo numérico de terreno (MNT) e imagens. Uma imagem digital pode ainda representar um PI de várias categorias, se a imagem não tiver sido ainda classificada. Trata-se de um PI de categoria imagem espectral. Caso se trate de uma imagem classificada, ter-se-á um PI do tipo dados poligonais (ou temáticos).

Dentro de um PI o usuário pode definir curvas de nível, objetos poligonais e classes. As classes são atributos cujos valores podem ser oriundos do método de classificação utilizado. Os objetos são elementos que correspondem a ocorrências geográficas, como por exemplo, municípios ou estados num mapa de divisão política, rios e lagos num mapa hidrográfico, etc.

Como citado anteriormente, em cada categoria, a informação pode ser representada de várias formas diferentes, cada uma sendo a mais apropriada para um tratamento específico. Essas variantes de representação de uma categoria são denominadas formatos. Os formatos dos dados dentro de um SIG estão associados às formas de represen-

tação digital no computador, das informações contidas na fonte de dados utilizada, que pode ser por exemplo, uma imagem ou um mapa. Dentre os formatos mais usados pode-se destacar o formato vetorial e o formato "raster" (varredura).

O formato vetorial é constituído por um conjunto de pontos definidos no espaço bidimensional-2D (X,Y), que descreve objetos na forma de vetores e que representam entidades tais como rios, estradas, isolinhas, divisões entre fronteiras e outras. Na representação vetorial, a posição de cada objeto é definida pela sua localização no mapa, que por sua vez é organizado pelo sistema de coordenadas de referência.

O formato "raster" é composto por elementos que são chamados pixels ou células, localizados em coordenadas contíguas implementadas como uma matriz de pontos, distribuídos regularmente no espaço bidimensional-2D (X,Y) de valores que representam uma área da região terrestre. O valor de cada elemento da matriz corresponde a um nível de cinza de uma pequena parte da área abrangida pela imagem, ou seja, para cada ponto da imagem existe um valor de nível de cinza que pode representar uma reflectância, um nível de declividade, um teor geoquímico, ou outra informação associada ao pixel. No formato "raster", a localização geográfica dos objetos ou condições de um pixel são definidas pela posição da linha e coluna ocupada por aquele pixel. A utilização deste formato está ligada ao fato de que a organização por varredura permite a incorporação direta de dados de sensoriamento remoto, como as imagens de satélites.

A integração entre os diversos PIs de uma região é feita num determinado formato, ou seja, todos os PIs que são integrados devem estar num mesmo formato. Para

isso o sistema provê "ferramentas" de conversão entre formatos, para que as informações possam ser combinadas.

2.5.1 - O SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DO INPE

Segundo Souza et al. (1990), as principais funções do sistema de informações geográficas desenvolvido pelo INPE (SGI) estão resumidas em cinco grupos, as quais se apresentam em forma de menus: "definição de dados", que estabelece a configuração do ambiente de processamento e permite executar operações de inicialização do projeto, descrição de um PI e estabelecimento de suas relações; "entrada"; "conversão"; "manipulação" e "saída". Detalhes sobre cada uma dessas funções podem ser encontrados no Manual do Usuário do SGI (INPE, 1989).

Conforme relatou Alves (1990), este sistema manipula dados "raster" e vetoriais, combinando mapas, imagens de satélite, MNTs, e informações descritivas. Os mapas digitais são uma importante fonte de dados para os SIGs. O intercâmbio desse tipo de dado é de grande importância, principalmente num país com território extenso como o Brasil, tendo em vista o custo elevado de criação e atualização das bases de dados cartográficos. Segundo o autor, em geral o tratamento das informações de diferentes fontes nos SIGs exige uma série de cuidados no que se refere à necessidade de se compatibilizar parâmetros de escala, projeção e "data" diferentes. Na prática, esta compatibilização se faz necessária, seja devido a inexistência do documento na escala especificada, seja porque os dados já tenham sido introduzidos no sistema para um trabalho em outra escala.

Segundo Ii et al. (1990), o SIG do INPE (versão 2.3) permite a utilização de sistemas de projeção que viabilizam trabalhos em diversas escalas, e incluem as

seguintes projeções: UTM (Universal Transversa de Mercator), Cônica Conforme de Lambert, Mercator, Policônica, Gauss-Kruger, Cilíndrica Equidistante, UPS (Universal Polar Estereográfica), Cônica Conforme Bipolar Oblíqua, Cônica Equivalente de Albers e Miller. De acordo com esses autores, a integração de imagens orbitais à base de dados cartográficos exige um processo de geocodificação, que consiste na correção geométrica das imagens, vinculando-as a um sistema de projeção da base dados, o que será abordado a seguir.

2.5.2 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO SIG

As imagens de sensoriamento remoto não são mapas, contudo as informações extraídas das imagens podem ser integradas a dados cartográficos num SIG, ou mesmo apresentadas em forma de mapas. A transformação de uma imagem, de modo que ela tenha as propriedades de escala e projeção de um mapa é chamada de correção geométrica ou geocodificação (Mather, 1987).

Existem várias técnicas para corrigir diversos tipos de distorções presentes em uma imagem. Um dos procedimentos mais usados não engloba a plataforma de aquisição dos dados, ou seja, independe do conhecimento das fontes e tipos de distorções na imagem. A geometria da nova imagem ou da imagem corrigida depende do estabelecimento de relações matemáticas entre a localização dos pixels na imagem e as coordenadas correspondentes àqueles pontos no terreno, ou seja, a partir de funções polinomiais que relacionam as coordenadas "l" e "c" (linha e coluna) dos pontos de controle selecionados sobre a imagem, com as coordenadas planas tiradas dos mapas. Dessas relações, a natureza da distorção pode ser estimada e corrigida (Richards, 1986; Mather, 1987).

Segundo Mather (1987), se o georeferenciamento não é importante, uma imagem pode ser escolhida como a base na qual a outra será registrada, ou seja, ajustada segundo o sistema de projeção da imagem que servir de base.

Segundo Erthal et al. (1983), em estudos ambientais surgem diversas situações em que há necessidade de se fazer uma análise conjunta de várias imagens, correspondentes a uma mesma região e obtidas em datas diferentes. Este é o caso, por exemplo, da avaliação multi-temporal da alteração da cobertura vegetal de uma região. Para que a análise multi-temporal possa ser feita, é necessário que as imagens correspondentes a cada passagem estejam em correspondência ponto a ponto. Este processo é denominado registro de imagem.

Conforme Ii et al. (1990), o conceito de geocodificação, a nível de um SIG relaciona-se à aplicação que se deseja fazer, ou seja, depende das informações já existentes ou a serem armazenadas na base de dados. Uma imagem é dita geocodificada, quando está registrada com dados georeferenciados existentes, através de feições homólogas. Uma imagem geocodificada está sempre orientada para o norte do sistema de projeção utilizado, isto é, as linhas da imagem dispõem-se perpendicularmente à direção norte da projeção.

Esses autores colocam como a primeira etapa do processo de geocodificação, a interação do usuário com o sistema para definir a distribuição espacial das informações na base de dados, ou seja, estabelecer o sistema de projeção ao qual se deseja vincular a imagem de trabalho. Nesta fase o usuário informa ao sistema os parâmetros de projeção necessários para a definição do projeto.

Em decorrência da não disponibilidade de programas de correção geométrica para as imagens AVHRR implementadas em microcomputadores no país, Figueiredo (1990) realizou em sua dissertação o estudo de algoritmos e o desenvolvimento e implantação de programas de navegação para imagens AVHRR em ambiente SITIM. Certamente, tais programas possibilitaram melhor exploração do potencial das imagens AVHRR, até então de pouco uso no país pelo seu grau de distorção geométrica.

O termo navegação é simplesmente o processo de transformação matemática entre os sistemas de referência do satélite (linha e coluna) e o de coordenadas terrestres (latitude e longitude). Ou seja, "navegar" consiste em obter a localização de um pixel da imagem, dado que se conhece sua linha e coluna, e vice-versa.

Os programas desenvolvidos por Figueiredo (1990) foram utilizados no processo de geração de imagens de índice de vegetação corrigidas geometricamente, no cálculo de índice de vegetação para localidades de interesse e na obtenção da latitude e longitude de pontos assinalados sobre as imagens AVHRR e reciprocamente.

Amaral (1992), descreve a correção das imagens AVHRR, através da modificação do programa desenvolvido por Figueiredo (1990), para a elaboração de imagens índice de vegetação de diferença normalizada, com as imagens AVHRR, que apresenta como produto uma imagem com níveis de cinza equivalentes ao cálculo do índice, na projeção cilíndrica eqüidistante, com resolução de 5 km. Foi feita a modificação de modo a se obter, uma imagem de índice de vegetação e das bandas espectrais isoladas com resolução de 2 km, ajustadas à projeção cilíndrica eqüidistante.

Os dados AVHRR referentes a imagem classificada digitalmente, assim como os dados TM, provenientes da interpretação visual, foram transportados para o SGI. As operações realizadas no SGI tiveram como objetivo a viabilização da comparação qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos a partir da classificação das imagens TM e AVHRR.

A autora observou que a apresentação de imagens no SGI possui limitações próprias do sistema quando se trata de imagens de baixa resolução, como é o caso das imagens AVHRR. Dependendo do fator de ampliação desejado, as feições da imagem AVHRR aparecem deslocadas ou não em relação às feições de referência da imagem TM, por exemplo. Isto decorre da função de visualização no SGI considerar como critério de posicionamento dos pixels a atribuição de uma coordenada ao centro do pixel.

Ainda segundo a autora, o efeito descrito acima não consistiu em limitação para o uso de imagens AVHRR no SGI, visto que a sobreposição, considerando coordenadas de imagem, linha e coluna, e coordenadas de projeção, x e Y, ocorre de maneira satisfatória. A melhora da sobreposição depende, além da precisão e distribuição dos pontos de controle, da precisão na digitalização de dados TM.

2.5.3 - O SIG EM APLICAÇÕES NA AVALIAÇÃO DE DESMATAMENTOS POR SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto juntamente com o SIG, oferece o melhor meio de planejamento e monitoramento sistemático de mudanças e tendências em florestas tropicais (Sader e Joyce, 1985).

Atualmente, encontra-se em desenvolvimento no INPE o Sistema de Informações "Amazonia", projeto referente a avaliação do desmatamento da Amazônia Legal Brasileira. Este projeto é baseado na interpretação visual de imagens TM/Landsat na escala 1:250.000, de onde são gerados dados da alteração da cobertura vegetal da região. Os dados são digitalizados e entram no SGI, constituindo uma base de dados multi-temporal e anual, que pode ser manipulada de forma a otimizar o processo de estimativas de áreas desmatadas.

No SGI, a base de dados é organizada em projetos, que correspondem a cartas topográficas ou cartas imagem (radar) na escala 1:250.000, em projeção UTM. Cada carta constitui um projeto, formado por planos de informação, com informações da extensão do desmatamento para o primeiro ano estudado e incrementos para os outros anos de estudo, informações da hidrografia da região e outras. São consideradas as alterações desde 1984 até 1990, em toda a Amazônia Legal Brasileira, desde que haja disponibilidade de imagens para cada um desses anos e que haja disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens para todas as áreas do projeto (Tardin et al., 1991; Alves et al., 1992).

Cross (1990a), interessado no mapeamento digital de grandes áreas para facilitar o monitoramento de desmatamentos, desenvolveu uma pesquisa metodológica na qual utilizou imagens AVHRR integradas ao SIG, em estudos de desmatamentos no estado de Rondônia. As imagens foram corrigidas geometricamente para a remoção de distorções devido à curvatura da terra e à variação do ângulo de varredura. Em seguida, as imagens foram registradas, utilizando-se pontos de controle, e classificadas.

Para a classificação, o autor adotou, após vários testes, o classificador MAXVER, que classificou áreas de floresta e não floresta, considerando a resposta espectral termal e refletida. Comparando-se a classificação das imagens AVHRR com as imagens TM, foi verificado que no mapeamento realizado com as imagens pode-se distinguir com sucesso o padrão de desmatamento do tipo "espinha de peixe", mas houve uma superestimativa da área desmatada em 20%. Contudo, em geral, o mapa gerado foi considerado confiável para subseqüentes análises no SIG.

Uma descrição mais detalhada e abrangente pode ser encontrada em Cross (1990b).

Skole et al. (1990), apresentaram os resultados obtidos no desenvolvimento de uma base de dados digitais em um SIG, com dados de desmatamentos da região amazônica, tendo como base mapas do INPE/IBDF para 1979 (Tardin et al., 1980). A base de dados com informações sobre desmatamentos, organizada por módulos equivalentes a uma zona UTM, foi combinada à base de dados com os limites dos municípios, fornecendo assim, estimativas de áreas desmatadas por município, para os anos de 1975 e 1978, baseado em dados MSS/Landsat. A base de dados relativa às áreas alteradas, discriminou entre desmatamentos que ocorreram em floresta densa e no cerrado. Os limites de cerrado foram derivados do Projeto RADAMBRASIL na escala 1:2.500.000, e os limites de floresta e não floresta a partir dos dados AVHRR (LAC), obtidos por Cross (1990a).

As estimativas obtidas pelos autores, foram mais altas em 24% e 33% para os anos de 1975 e 1978 respectivamente, quando comparadas às estimativas apresentadas por Tardin et al., (1980), o que pode ser explicado provavelmente devido à diferença entre as metodologias adotadas.

Esta nova base de dados forneceu, além de estimativas de desmatamentos a nível municipal para os anos de 1975 e 1978, a média anual de desmatamento ocorrido entre os anos de 1975 e 1978.

Conforme os autores, a integração entre sistemas orbitais e sistemas de informações geográficas, otimiza o trabalho de monitoramento e análise de desmatamentos. Os autores concluíram que a codificação digital dos dados de desmatamentos oriundos de sensoriamento remoto em um SIG proporciona o meio adequado para o gerenciamento do grande volume de dados de regiões extensas e deve ser uma importante fonte de estudos para trabalhos futuros.

Skole e Tucker (1993), estimaram para toda a floresta Amazônica brasileira o total de área desmatada, de floresta fragmentada (áreas menores que 100 km^2 cercadas por desmatamento), e o efeito de bordas (do limite floresta não-floresta até 1 km para dentro da floresta) causado pelo desmatamento, no período de 1978 a 1988. Foram interpretadas visualmente imagens TM/Landsat banda 5 na escala 1:500.000. As informações foram digitalizadas em um SIG, e os autores concluíram que de 1978 para 1988 o desmatamento em floresta densa na região cresceu de 78.000 km^2 para 230.000 km^2 , e as áreas severamente afetadas com relação a biodiversidade cresceram de 208.000 km^2 para 588.000 km^2 .

Cross (1991), demonstrou a eficácia do AVHRR como uma ferramenta a ser utilizada no monitoramento do desmatamento na Amazônia, através da aplicação de um procedimento de detecção de mudanças sobre a região de Alta Floresta no estado do Mato Grosso e sobre a região de Rondônia. Este estudo descreveu todo o processo, desde a aquisição da imagem bruta até a identificação das áreas, mostrando evidência da mudança na cobertura vegetal e final-

mente a integração das imagens (mapas de mudanças) com outros dados geo-referenciados em um SIG. O autor comparou a porcentagem de área classificada como floresta através do canal 4 do AVHRR com as estimativas TM, através de técnicas de imagem residual e operadores de Sobel, tendo obtido um coeficiente de correlação de 0,72 para a região de Alta Floresta e precisão média de classificação da ordem de 67 % comparando os dados dos dois sensores. Para a região de Rondônia obteve uma subestimativa de 30 % da taxa de desmatamento para os dados AVHRR em relação aos dados TM.

Embora o AVHRR já seja usado operacionalmente no Brasil para detectar queimadas na floresta (Setzer e Pereira, 1991), e haja numerosas tentativas de caracterizar mudanças na vegetação, utilizando uma seqüência temporal de dados IVDN (Towshend e Justice, 1986), nenhuma tentativa havia sido feita para desenvolver procedimentos de detecção de mudanças na cobertura vegetal diretamente de valores dos canais AVHRR (Cross, 1991).

Segundo Cross (1991), foi reconhecido no princípio que os "mapas de mudança" não representariam necessariamente as áreas de mudança, mas sim áreas que deveriam ser investigadas. Em outras palavras, "o trabalho pretendeu dirigir-se à pergunta onde? ao invés de quanto?"- o que entra em acordo com a concepção de um "sistema de alarme".

A metodologia descrita a seguir visa contribuir para programas de detecção de desmatamentos, através da interação SIG - sensoriamento remoto, com o desenvolvimento de um sistema semi-automatizado de detecção de mudanças em florestas tropicais com imagens AVHRR.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - ÁREA DE ESTUDO

Os critérios de seleção da área de estudo foram os seguintes: 1- localização na Amazônia, e com cobertura vegetal de diferentes características, como por exemplo, floresta densa e de transição; 2- apresentação de diferentes padrões espaciais de alteração; 3- localização abaixo do Equador, evitando-se assim regiões fora do alcance de gravação das imagens NOAA existentes e com alta frequência de cobertura de nuvens.

Os parágrafos a seguir baseiam-se em RADAM-BRASIL (1980).

A área de estudo selecionada (Figura 3.1) compreende uma região de aproximadamente 290.950 Km², abrangidos pela folha SC-21-Juruena. Sua localização, segundo a Divisão Cartográfica Internacional, encontra-se entre os paralelos 8° e 12° S e os meridianos 54° e 60° W.

O maior percentual da área em estudo concentra-se ao norte do estado do Mato Grosso. Outros estados parcialmente abrangidos nesta folha são o Amazonas a noroeste, o Pará a nordeste, e Rondônia a sudoeste.

Fundamentalmente, a cobertura vegetal da área está caracterizada por floresta ombrófila, floresta aberta, floresta estacional semidecidual e decidual, e vegetação de savana (cerrado). As áreas de tensão ecológica são comuns e ocupam grandes extensões, com espécies das florestas, formando grandes contatos. A hidrografia tem nos rios Juruena e Teles Pires seus maiores afluentes, que em sua confluên-

cia formam o Tapajós. A área tem clima do tipo tropical com 3 a 5 meses secos, entre maio e setembro, caracterizado por temperaturas médias elevadas durante o ano inteiro, (média anual das máximas de 31°C) e precipitação pluviométrica abundante (média anual de 2.000 mm), com período seco no inverno. Genericamente, o clima desta área é classificado, pelo sistema Köppen como AM: quente e úmido.

Um fenômeno característico na área é a ocorrência da névoa seca, provocada pela queima deliberada de pastagens para brota uniforme das gramíneas ressequidas, e de vegetação natural derrubada para ampliação da fronteira agropecuária.

Assim, podem ser encontrados na região padrões espaciais de desmatamento resultantes de projetos agropecuários de médio e grande porte. São encontrados também padrões intermediários e do tipo "espinha de peixe".

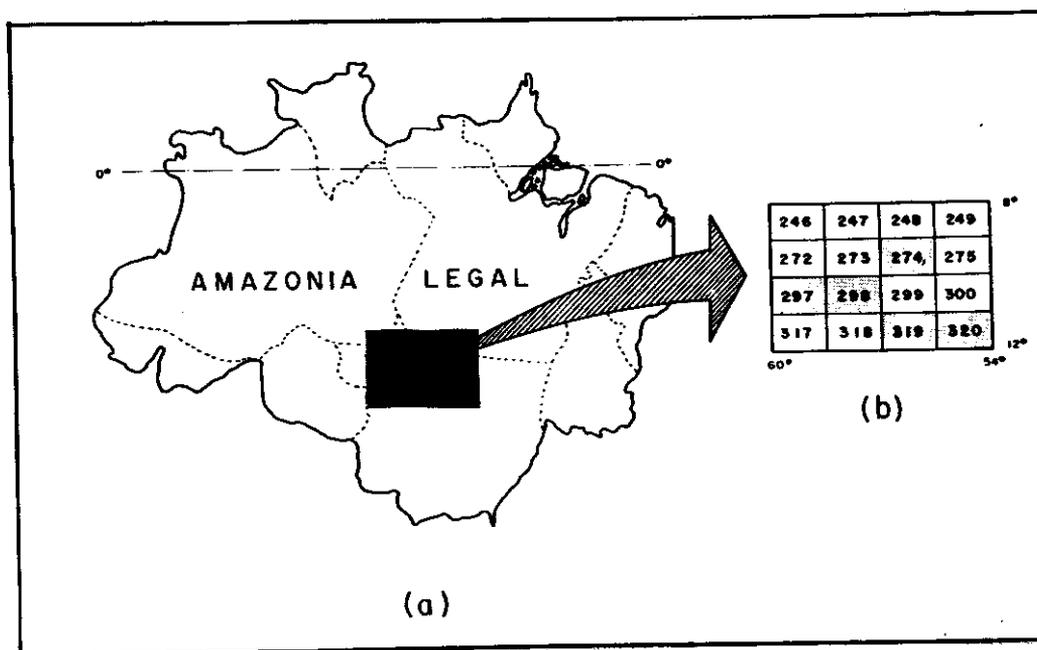


Fig. 3.1 - (a) Localização da área de estudo, correspondente à folha 1:1.000.000 "Jurueña"; (b) Localização das áreas amostrais utilizadas na aferição dos dados obtidos - cartas 1:250.000, MIR 274, 297, 298, 319 e 320.

FONTE: Adaptada de Alves et al. (1992), p.263

3.2 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1 - IMAGENS AVHRR

Foram utilizadas imagens AVHRR, no formato "High Resolution Picture Transmission" (HRPT), gravadas pela estação receptora do INPE de Cachoeira Paulista, SP. As imagens fazem parte de um conjunto gravado anualmente de junho a novembro, com a finalidade de detecção de queimadas.

Foram usadas duas imagens de 1990 e uma de 1989, conforme a Tabela 3.1. As imagens foram escolhidas com datas de 1989 e 1990 tendo em vista a comparação com os dados do projeto de avaliação do desmatamento na Amazônia (Sistema de Informações "AMAZONIA"), em imagens TM/Landsat, que vem sendo desenvolvido pelo INPE (Alves et al., 1992).

TABELA 3.1 - IMAGENS AVHRR/NOAA UTILIZADAS

Imagem AVHRR *	Data de Aquisição	Cruzamento com o Equador	
		Horário	Longitude
OQ72	17/09/89	17:40:04	57°13'48"
AM1284	30/07/90	18:10:53	60°42'36"
AM1361	15/09/90	17:59:16	56°51'00"

* Código das fitas no arquivo do setor PI do INPE em Cachoeira Paulista, SP.

Estas três imagens foram as que apresentaram menor cobertura de nuvem de um total de 60 imagens examinadas.

3.2.2 - CARTAS TEMÁTICAS

Foram utilizadas 5 cartas temáticas na escala 1:250.000 geradas pelo Sistema de Informações "AMAZONIA" (Alves et al., 1992) a partir da interpretação visual de imagens TM em papel fotográfico, composição colorida 3/4/5 produzidas pelo INPE/C. Paulista. Essas cartas fazem parte de um conjunto de 332 cartas do "AMAZONIA", que compõe a Amazônia Legal brasileira, e indicam o incremento anual de desmatamento na região. As 5 cartas temáticas escolhidas correspondem às áreas amostrais analisadas neste trabalho e

foram selecionadas considerando a disponibilidade das cartas no "AMAZONIA", e os locais de desmatamentos mais intensos. A Tabela 3.2 mostra as cartas escolhidas segundo o MIR, e as respectivas órbitas/ponto das imagens que originaram as cartas, com as datas de 1989 e 1990, utilizadas na interpretação visual dessas imagens.

TABELA 3.2 - IMAGENS TM/LANDSAT QUE ORIGINARAM AS CARTAS
TEMÁTICAS UTILIZADAS

Cartas (MIR)	Imagens TM (órbita/ponto)	Datas de Aquisição *
274	227/66	21/07/89 - 24/07/90
	227/67	21/07/89 - 26/09/90
	228/66	14/09/89 - 01/09/90
	228/67	26/06/89 - 01/09/90
297	229/67	20/08/89 - 07/08/90
	229/68	05/09/89 - 07/08/90
	230/67	12/09/89 - 30/08/90
	230/68	12/09/89 - 30/08/90
298	228/67	26/06/89 - 01/09/90
	228/68	28/07/89 - 01/09/90
	229/67	20/08/89 - 07/08/90
	229/68	05/09/89 - 07/08/90
319	226/68	14/07/89 - 02/08/90
	227/68	21/07/89 - 26/09/90
	228/68	28/07/89 - 01/09/90
320	225/68	08/08/89 - 28/09/90
	226/68	- 02/08/90
	227/68	21/07/89 - 26/09/90

* Das imagens TM utilizadas no "AMAZONIA" foram relacionadas apenas as datas de 1989 e 1990, tendo em vista serem estas as datas de interesse deste trabalho.

3.2.3 - ARQUIVO DE CARTAS DIGITAIS

Foram utilizados arquivos digitais, provenientes do "AMAZONIA", cedidos pelo INPE, correspondentes aos projetos das áreas amostrais selecionadas nas imagens AVHRR/NOAA, cartas 274, 297, 298, 319 e 320. Dos arquivos digitais, foram utilizados os planos de informações (PIs) referentes à extensão de desmatamentos com incremento anual (maiores detalhes no item 2.5.3), os PIs com a moldura das cartas e ainda os PIs com limites de áreas de fisionomia de não floresta (cerrados, campos, etc.).

3.2.4 - SISTEMA DE TRATAMENTO DE IMAGENS (SITIM)

Foi utilizado o sistema SITIM-340, assim como suas funções (ENGESPAÇO, s.d.) na leitura, transferência e classificação das imagens AVHRR. Uma abordagem mais detalhada deste sistema encontra-se no capítulo 2 deste trabalho, e a descrição de sua utilização consta do Manual do Usuário do SITIM (INPE, 1986).

3.2.5 - SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Foi utilizado o SIG/INPE (SGI) na manipulação de imagens AVHRR e informações necessárias para a realização deste trabalho. Uma abordagem com mais detalhes sobre o SGI encontra-se no capítulo 2 deste trabalho, e as instruções para sua utilização constam no Manual do Usuário do SGI (INPE, 1989).

3.3 - MÉTODOS

3.3.1 - SELEÇÃO DOS PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A fim de se evitar problemas de distorção de borda, as imagens foram escolhidas de forma que a área de

interesse estivesse na porção central da imagem, no máximo até cerca de 300 colunas do nadir, ou seja, até um ângulo de varredura de cerca de 15° . As datas foram selecionadas de modo que estivessem dentro do período seco da região, ou seja, entre os meses de junho e novembro, procurando-se também evitar imagens com cobertura de nuvens.

Algumas imagens foram lidas na Unidade de Fita do Laboratório de Meteorologia do INPE, utilizando-se o programa CCNOAA (Figueiredo, 1990) para fitas de 10 bits e o CNOAA8 (Fernandes, 1990) adaptado de Figueiredo (1990) para fitas de 8 bits, em ambiente SITIM. Outras imagens foram lidas na Unidade de fita do LTID (Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais), na estação de trabalho SUN, utilizando-se o Programa LENOAA (Arai, 1991).

3.3.1.1 - GRAVAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Após cada imagem ter sido selecionada segundo os critérios mencionados no item 3.3.1, foi utilizado o arquivo de parâmetros da imagem como dado para o programa LLLCFITA (Figueiredo, 1990), que com a informação das latitudes e longitudes da área de interesse, informa as respectivas linhas e colunas da imagem em fita. Assim, foi possível gravar da imagem AVHRR original apenas a área de estudo, entrando-se nos programas com as coordenadas de fita (linha, coluna) no modo terminal. Para a gravação da área de estudo no Laboratório de Meteorologia utilizou-se os programas CCNOAA ou CNOAA8, e para a gravação na SUN o programa LENOAA.

3.3.2 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS AVHRR

O processamento das imagens foi realizado em ambiente SITIM. Uma vez que seriam produzidas no SGI imagens resultantes de cruzamento de imagens AVHRR, foi feita

uma transformação geométrica nas imagens de forma que elas pudessem se sobrepor ajustadamente. Foi necessário também que as imagens estivessem geocodificadas, permitindo assim sua integração no SGI com outros planos de informação (PIs), (neste caso, os PIs provenientes da base de dados da Amazônia - Sistema de Informações "AMAZONIA"). Desta forma, com a imagem referenciada a um sistema de projeção, os pixels AVHRR puderam ser associados às localizações geográficas do terreno conforme sua posição na grade.

Primeiramente, foi utilizado o programa de ajuste NAVE (Fernandes, 1992a), adaptado de Figueiredo (1990), que por sua vez utiliza como base os algoritmos de cálculo orbital sugeridos por Medeiros et al. (1986). Este programa ajusta os seguintes dados do arquivo de parâmetros orbitais da imagem: horário inicial de gravação, e longitude de cruzamento com o Equador. Para tanto, foram necessários além do arquivo de parâmetros orbitais e descritor da imagem, pontos de controle, obtidos em cartas da região, na escala 1:1.000.000.

O programa NAVE também permite verificar se o ajuste está adequado. Através de transformação do sistema de referência da imagem (linha e coluna) para o sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude), verifica-se para qualquer ponto da imagem sua correspondência na carta.

Em seguida procedeu-se à correção geométrica das imagens AVHRR através do programa DESFLO (Fernandes et al., 1993), adaptado de Figueiredo (1990). O programa gerou imagens com resolução de 1,1 km na projeção cilíndrica eqüidistante, a partir dos parâmetros de aquisição de imagem e de órbita do satélite já ajustados pelo programa NAVE, o que proporcionou o registro entre as imagens de datas diferentes.

A fim de se testar a precisão de localização de pontos nas imagens AVHRR corrigidas, foi transferida para o SGI a banda 2 de uma dessas imagens. A banda 2, normalmente com maior contraste para feições terrestres que a banda 3, foi utilizada tendo em vista a melhor discriminação dos pontos de controle escolhidos, uma vez que esses pontos estão localizados ao longo de rios. Com a função "Calcular Coordenada" obteve-se as latitudes e longitudes de pontos de referência conhecidos da imagem. As coordenadas desses pontos foram extraídas de um mapa 1:1.000.000 da região de estudo (Folha SC-21 Juruena).

Adquiriu-se ainda as coordenadas desses mesmos pontos da imagem original (bruta), através do programa NAVE, procedendo-se então à comparação entre coordenadas extraídas do mapa e coordenadas correspondentes nas imagens AVHRR bruta e corrigida.

Devido aos bons resultados obtidos com o programa de ajuste (NAVE), na verificação de pontos da imagem e correspondentes na carta, foi possível utilizar imagens com resolução de 1,1 km.

Foi desenvolvido ainda um programa de correlação (Fernandes, 1993) - CORRTELA, que permitiu a verificação da qualidade do registro entre as imagens de diferentes datas. O algoritmo analisa a correlação de imagens duas a duas, sendo uma considerada como referência. O resultado é visual, apresentado na tela do microcomputador.

3.3.2.1 - O PROBLEMA DE NUVENS

Na banda 3 (3,55 - 3,93 um) houve inicialmente confusão de classificação de nuvens como floresta. Para solucionar este problema, foi implementada no programa

de geração das imagens corrigidas (DESFLO), a substituição, na banda 3, dos níveis de cinza de pixels de nuvens pelo valor 255. Para isto, utilizou-se a banda 2 (0,72 - 1,1 um) no reconhecimento dos pixels de nuvens.

3.3.2.2 - AVALIAÇÃO RADIOMÉTRICA DAS IMAGENS AVHRR

A manipulação das imagens NOAA neste trabalho envolveu a análise de diferentes imagens do mesmo sensor na mesma banda, e adquiridas em diferentes épocas. Um ponto importante da manipulação dessas imagens, é a existência de diferenças de contraste entre elas, ou seja, seus histogramas não coincidem em termos de média e desvio padrão (Crosta, 1992). Com isto, ocorre que na classificação, para algumas informações que são comuns à duas imagens, não é atribuída a mesma classe, o que representaria que houve mudança no período de tempo considerado, quando na verdade não houve.

Desta forma, analisou-se estatisticamente em cada imagem, os pixels de floresta nas áreas amostrais com a função "Cálculo de Estatísticas", oferecida pelo SITIM, para se definir um limiar mínimo para esta classe, e que foi diferente para cada imagem. Este procedimento equivaleu a um aumento de contraste linear para minimizar efeitos da falta de equalização da média e do desvio padrão dos histogramas das imagens. É importante ressaltar que as imagens corrigidas de 1,1 km possuíam suas características radiométricas originais.

3.3.2.3 - CLASSIFICAÇÃO

Para estudos de desmatamento na Amazônia com AVHRR, Amaral (1992) sugere o uso da banda 3 utilizando-se apenas o fatiamento de níveis de cinza. Esta é uma técnica

simples de classificação, se comparada às que utilizam combinações de bandas. Estas combinações, além de requererem maior tempo computacional de processamento, exigem amostragem muito criteriosa e conhecimento da região de interesse para treinamento das amostras, como é o caso do classificador MAXVER. A autora citou que embora a classificação por fatiamento da banda 3 tenha apresentado confusão entre as classes de cerrado e desmatamento, ainda assim apresentou visualmente resultado melhor que a aplicação do MAXVER. Deste modo, em estudos AVHRR de florestas, áreas de cerrado e desmatamento devem ser consideradas como pertencentes a uma só classe.

Sendo assim, baseado em resultados obtidos por Amaral (1992) para a classificação digital da banda 3 das imagens AVHRR, utilizou-se a técnica de o fatiamento de níveis de cinza. Foram classificados os seguintes temas:

- 1 - floresta, incluindo os diferentes tipos de floresta que existem na região, não havendo distinção entre elas;
- 2 - áreas de alteração antrópica, incluindo as áreas desmatadas e queimadas;
- 3 - nuvem e fumaça.

Como não foi possível a separação das áreas de cerrado, parte dessas áreas foram incluídas em domínio de floresta, e parte em áreas de alteração.

3.3.3 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS NO SGI

O SGI foi desenvolvido para funcionar de forma integrada com o SITIM no que se refere aos aplicativos orientados para sensoriamento remoto (INPE, 1989). No

SGI, na opção "ENTRADA", a função "ENTRADA DE IMAGENS", proporciona a transferência das imagens do SITIM para o SGI (INPE, 1989). Neste caso, as imagens transferidas foram as imagens AVHRR classificadas.

Para que fosse possível a entrada no SGI de imagens diferentes na mesma banda, foi necessária a modificação do programa de entrada no SGI, criando-se então o Ent_ima (Felgueiras, 1993), uma vez que o sistema nomeia o plano de informação (PI) com o mesmo nome da banda.

Ao efetuar no SGI a entrada de imagens, o PI é criado automaticamente e a imagem inserida nele. O projeto com os dados AVHRR foi definido na projeção cilíndrica equidistante. O projeto de trabalho contém os PIs com as imagens classificadas e com as imagens resultantes dos cruzamentos realizados para cada experimento, conforme descrito no item a seguir.

3.3.3.1 - MANIPULAÇÃO DOS DADOS

Após as imagens AVHRR/banda 3 terem sido classificadas para uso em dois tipos de comparações (imagens com datas de um ano de diferença, e imagens referentes ao início e final da estação seca da região), procedeu-se à operação de cruzamento no SGI realizada na função "CRUZAR", na opção de "MANIPULAÇÃO" do sistema.

As imagens de duas datas distintas, já registradas geometricamente, foram cruzadas pixel a pixel para produzir uma imagem resultante com as diferenças entre as duas datas (imagem diferença). A imagem resultante indicou a alteração ocorrida na cobertura vegetal da região, no período entre as duas datas. Através desta operação, foi criado então o PI com a imagem diferença.

O cruzamento entre as imagens AVHRR no SGI é realizado a partir de um arquivo em padrão ASCII que define as imagens a serem cruzadas, as classes de interesse, e a regra de cruzamento. No caso das imagens de setembro de 1989 e setembro de 1990 foi criado o seguinte arquivo para ser acessado pelo SGI, de acordo com o formato reconhecido pelo sistema (INPE, 1989):

```
#s89 a; primeiro PI, imagem de set/89
```

```
#s90 b; segundo PI, imagem de set/90
```

```
*não-floresta 6; primeira classe cor 6
```

```
*floresta 5 ; segunda classe cor 5
```

```
*outros 4; quarta classe (desmat.antigo+cerrado) cor 4
```

```
*nuvem 1; terceira classe cor 1
```

```
*veg.sec. 3; quinta classe cor 3
```

```
:não-floresta = b1 ^a1
```

```
:floresta = a2 b2
```

```
:outros = a1 b1
```

```
:nuvem = |a3 |b3
```

```
:veg.sec = a1 ^b1
```

As duas primeiras linhas deste arquivo definem os planos de informação a serem cruzados, especificando as duas imagens AVHRR utilizadas. Nas cinco linhas seguintes precedidas pelo símbolo "*" (asterisco), foram defini-

das as cinco classes de interesse, associadas às cores que lhes seriam atribuídas na imagem AVHRR resultante do cruzamento das duas imagens especificadas nas duas primeiras linhas. Finalmente, nas linhas precedidas por ":" (dois pontos) encontra-se a regra de cruzamento para cada uma das cinco classes, onde:

- a classe "não-floresta" representa o que era floresta em setembro de 1989 e deixou de sê-lo em setembro de 1990, sendo indicada por "b1 ^a1";
- a classe "floresta" representa tudo que era floresta em 1989 e também em 1990, sendo indicada por "a2 b2";
- a classe "outros" é formada pela interseção da classe "não-floresta" nas duas imagens, ou seja, tudo que já existia de desmatamento e cerrado em 1989 e continuou existindo em 1990, sendo representada por "a1 b1";
- a classe "nuvem" é formada pelas nuvens existentes na imagem de 1989 somadas às nuvens de 1990. Desta forma, as áreas onde há nuvens não são analisadas. Esta classe é indicada por "|a3 |b3";
- a classe "veg.sec." (vegetação secundária) representa áreas que foram classificadas como desmatamento na imagem de 1989, e como floresta na imagem de 1990, esta classe é indicada por "a1 ^b1".

Para o cruzamento das outras imagens foi utilizada a mesma regra de cruzamento, mudando-se somente o nome dos PIs.

3.3.3.2 - COMPARAÇÃO DOS DADOS AVHRR E TM PARA AFERIÇÃO DOS RESULTADOS

A comparação dos dados AVHRR de desmatamentos em relação aos dados TM foi feita tanto para verificar a eficiência da detecção AVHRR como para avaliar possíveis limitações em estimativas de área desmatada indicada pelo AVHRR.

A eficiência da detecção de desmatamentos pelo AVHRR foi avaliada utilizando-se o conceito de amostragem simples (Congalton, 1988). Assim, foram selecionadas "n" amostras (polígonos de desmatamentos) de uma população de "N" unidades (cartas temáticas TM 274, 297, 298, 319 e 320), de forma a representar os diferentes tamanhos de áreas desmatadas ocorrentes na região de estudo. Cada amostra pode ser identificada por coordenadas "x e y" de seu centro. Todos os locais de áreas desmatadas selecionados, (num total de 216 para a imagem resultante de setembro de 1989 com setembro de 1990, e 221 para julho e setembro de 1990), foram sobrepostos às áreas amostrais nas imagens AVHRR resultantes e analisados em termos de proporção de acertos. Conforme Hay (1979) e Hord e Brooner (1976), nestes casos o número mínimo de amostras "n" seria de 50.

a) Eficiência na Detecção AVHRR

Cada desmatamento ocorrido entre setembro de 1989 e setembro de 1990, conforme análise das cartas temáticas TM, foi definido por seu contorno e representado pelas coordenadas geográficas aproximadas de seu centro geográfico. Para cada um dos centros geográficos, ou "pontos", foi verificada a existência de desmatamento correspondente na imagem AVHRR resultante .

Este procedimento foi conduzido no SGI, tanto para a determinação das coordenadas dos pontos nas cartas TM (cartas 274, 297, 298, 319 e 320, elaboradas a partir de dados TM) como para verificação na imagem AVHRR resultante. Primeiramente, cada carta TM 1:250.000 foi calibrada em mesa digitalizadora acoplada ao SGI, garantindo a compatibilidade do sistema de projeção através da seleção de quatro pontos de controle e do uso da função SGI "Calibrar Mesa". Em seguida, com a função "Cálculo de Coordenada", foram extraídas das cinco cartas temáticas 216 pontos de desmatamentos do total de cerca de 1.500 existentes; esta extração seguiu o princípio aleatório mencionado anteriormente.

As coordenadas dos 216 pontos foram digitadas em um arquivo ASCII, o qual, através do programa Le_Ponto (Fernandes, 1992b) criou um PI de pontos para sobreposição à imagem AVHRR resultante. Esta sobreposição foi realizada em um projeto SGI específico e apresentada na tela do sistema. Através de análise visual da tela foram então determinados os índices de acertos e de erros pelo AVHRR; através de comparação com as cartas TM foram também determinados os tipos de cobertura vegetal onde ocorreram os erros.

Foi realizada previamente, nas cartas TM e imagens AVHRR, uma verificação para ser definido o menor tamanho dos polígonos de desmatamento AVHRR que eram sempre identificados. O menor tamanho destes polígonos foi 3,1 km², havendo 50 deles no total de 216 casos considerados. A proporção de acertos de desmatamentos corretamente localizados foi então determinada para os polígonos maiores e menores que 3,1 km².

Uma estimativa de "falsos alarmes", ou seja, áreas de novos desmatamentos detectadas na imagem AVHRR resultante, mas não encontradas nas cartas TM, foi obtida através da comparação do total de polígonos de novos desmatamentos verificados na imagem AVHRR resultante com os mapas TM correspondentes.

No caso da imagem AVHRR resultante de julho e setembro de 1990, foram seguidos os mesmos procedimentos, cabendo observar que neste caso foram extraídos 221 pontos e que as cartas TM usadas para verificação foram as mesmas do período set./89 - set./90. Esta limitação decorreu do fato do arquivo de imagens TM do INPE e usado no "AMAZONIA" não dispor de imagens adicionais.

b) Limitação de Estimativas de Área com o AVHRR

A comparação de estimativas de áreas desmatadas foi feita considerando-se o total de área desmatada indicado nas cinco cartas TM como valor referencial. Para estas cinco cartas TM foram utilizados os valores de área desmatada no relatório original do "AMAZONIA". Estes dados foram comparados com a área desmatada em cada setor correspondente na imagem AVHRR resultante. Estas áreas, por sua vez, foram fornecidas automaticamente pelo SGI, através da função "Cálculo de Área" aplicada à classe "não-floresta" em cada um dos setores.

A definição dos setores na imagem AVHRR foi conseguida com a função SGI "Mascarar PI", importando-se os PIs referentes às cartas TM digitalizadas pelo "AMAZONIA". Esperava-se utilizar apenas a o PI "moldura" das referidas áreas correspondentes às cartas, mas foram observados erros de congruência geográfica causados aparentemente pelo SGI, na conversão de coordenadas UTM para cilíndrica eqüidis-

tante. Foi então necessário utilizar-se polígonos de desmatamento nas cartas TM e imagem AVHRR para reposicionamento referencial, obtido através da função SGI "Calcular Coordenada", e do algoritmo "ESCREF" (Ii, 1988).

3.3.3.3 - SAÍDA

Os PIs formados por imagens AVHRR resultantes possibilitam a geração de cartas (opção "Saída" no SGI) com identificação das áreas de alerta, ou seja, áreas onde na primeira imagem analisada há floresta, e na imagem subsequente verifica-se a possível ocorrência de desmatamentos. A função "Cálculo de Coordenada" do sistema, permite que sejam fornecidas as coordenadas geográficas (latitude e longitude) destas áreas de interesse.

3.4 - FLUXOGRAMA DE TRABALHO

Uma visualização gráfica das etapas realizadas neste trabalho encontra-se na Figura 3.2.

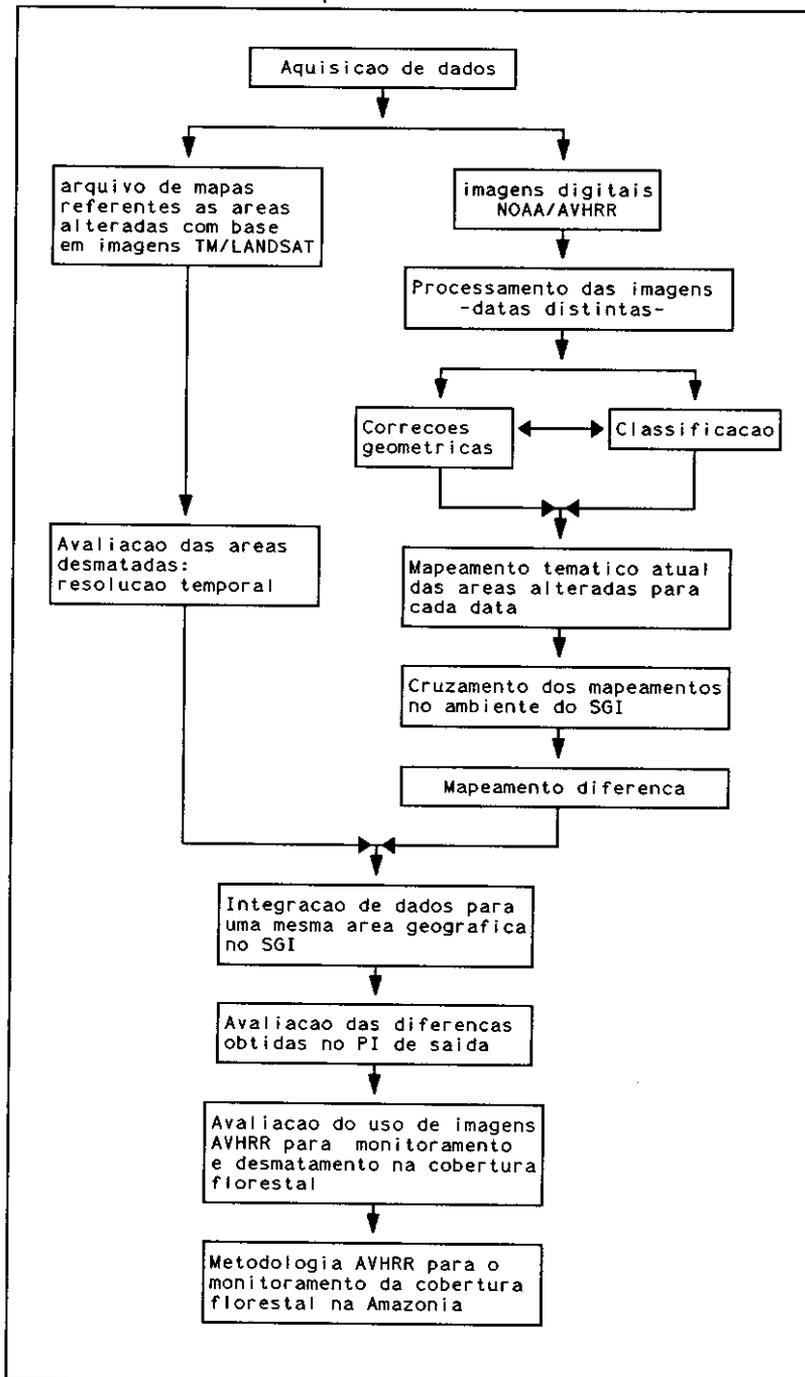


Fig. 3.2 - Fluxograma de trabalho.

3.5 - RESUMO DA METODOLOGIA

A metodologia descrita nos itens 3.3.1 a 3.3.3.3 está resumida na Tabela 3.3, citando os programas e meios desenvolvidos nesta pesquisa.

TABELA 3.3 - RESUMO DA METODOLOGIA SEGUNDO AS ETAPAS, MEIOS E FINALIDADES DE CADA PROCEDIMENTO ADOTADO

RESUMO DA METODOLOGIA		
ETAPAS	FERRAMENTA	FINALIDADE
1) Aquisição das imagens AVHRR (Banda 3)	Programas CCNOAA, CNOA8 e LENOAA	Leitura e gravação das imagens AVHRR
2) Processamento digital	Programa NAVE	Ajuste dos parâmetros
	Programa DESFLO	Correção geométrica Reconhecimento de nuvens
	Programa CORTELA	Verificação do registro
3) Integração dos dados no SGI	SITIM/Fatiamento	Classificação
	Cruzamento das imagens	Mapeamento diferença
	Cálculo de coordenadas	Localização de áreas alteradas
	Geração de cartas	obtenção do mapeamento temático

CAPÍTULO 4RESULTADOS E DISCUSSÃO4.1 - CORREÇÃO GEOMÉTRICA DAS IMAGENS AVHRR

Após terem sido ajustados os arquivos de parâmetros orbitais das imagens AVHRR originais e realizada a correção geométrica, obteve-se imagens com resolução nominal de 1,1 km da área de estudo, na projeção cilíndrica eqüidistante.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos da comparação entre as coordenadas extraídas do mapa e as coordenadas correspondentes nas imagens AVHRR bruta e corrigida.

Conforme pode ser observado na Tabela 4.1, as imagens AVHRR geometricamente corrigidas forneceram dados georeferenciados com precisão maior que nas imagens com parâmetros orbitais nominais. As médias das diferenças obtidas entre as coordenadas extraídas do mapa e as coordenadas nas imagens foram de: 4'08" em latitude e 47" em longitude para a imagem original, e 07" em latitude e 16" em longitude para a imagem com correção geométrica. Considerando-se que no Equador um grau de latitude ou longitude corresponde a aproximadamente 111 km, um minuto a cerca de 1,85 km e um segundo a cerca de 31 m, a precisão da imagem corrigida foi em média: 215 m em latitudes, e 493 m em longitudes. Estes valores são menores que a dimensão de um pixel no nadir (1,1 km), indicando portanto resultado excepcional no método usado para correção das imagens brutas.

**TABELA 4.1 - COORDENADAS DOS PONTOS ADQUIRIDOS PARA
VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO**

Coordenadas Extraídas do Mapa	Coordenadas nas Imagens AVHRR		Mapa AVHRR *	
	Imagem Bruta	Imagem Corrigida	Brut.	Cor.
(P1) Lat.: S 10°25'59,76" Long.: O 58°19'16,63"	S 10°30'35" O 58°19'35"	S 10°26'08,17" O 58°19'30,24"	4'36" 19"	09" 14"
(P2) Lat.: S 10°58'35,83" Long.: O 58°19'41,59"	S 11°00'50" O 58°21'41"	S 10°58'31,32" O 58°19'59,80"	2'15" 2'00"	04" 18"
(P3) Lat.: S 08°45'36,93" Long.: O 57°25'09,86"	S 08°51'21" O 57°25'18"	S 08°45'41,57" O 57°24'49,06"	5'45" 8'00"	05" 20"
(P4) Lat.: S 11°00'05,21" Long.: O 55°50'44,95"	S 11°03'32" O 55°50'19"	S 10°59'55,81" O 55°50'43,08"	3'27" 26"	10" 02"
(P5) Lat.: S 08°42'20,99" Long.: O 58°19'51,24"	S 08°48'16" O 58°20'49"	S 08°42'24,44" O 58°19'59,80"	5'55" 58"	03" 09"
(P6) Lat.: S 11°06'36,27" Long.: O 55°17'43,50"	S 11°08'10" O 55°17'48"	S 11°06'30,07" O 55°17'42,55"	1'34" 05"	06" 01"
(P7) Lat.: S 10°41'58,12" Long.: O 57°56'05,93"	S 10°49'38" O 57°54'08"	S 10°42'01,95" O 57°56'15,01"	7'04" 1'57"	03" 09"
(P8) Lat.: S 09°29'33,70" Long.: O 58°16'42,50"	S 09°34'20" O 58°16'05"	S 09°29'48,77" O 58°16'03,31"	4'47" 38"	15" 39"
(P9) Lat.: S 09°39'41,85" Long.: O 55°56'58,68"	S 09°42'37" O 55°55'49"	S 09°39'40,16" O 55°56'08,24"	2'56" 1'09"	02" 50"
(P10) Lat.: S 10°06'38,25" Long.: O 55°32'53,62"	S 10°09'44" O 55°32'47"	S 10°06'53,54" O 55°32'53,62"	3'06" 06"	15" 00"

* Diferenças entre as coordenadas do mapa e coordenadas das imagens AVHRR bruta e Corrigida.

Para este teste foi utilizada a imagem de setembro de 1990 (Figura 4.1). Esta imagem foi escolhida devido a seu padrão radiométrico mais contrastante na banda 2, o que facilitou o reconhecimento dos pontos de controle.

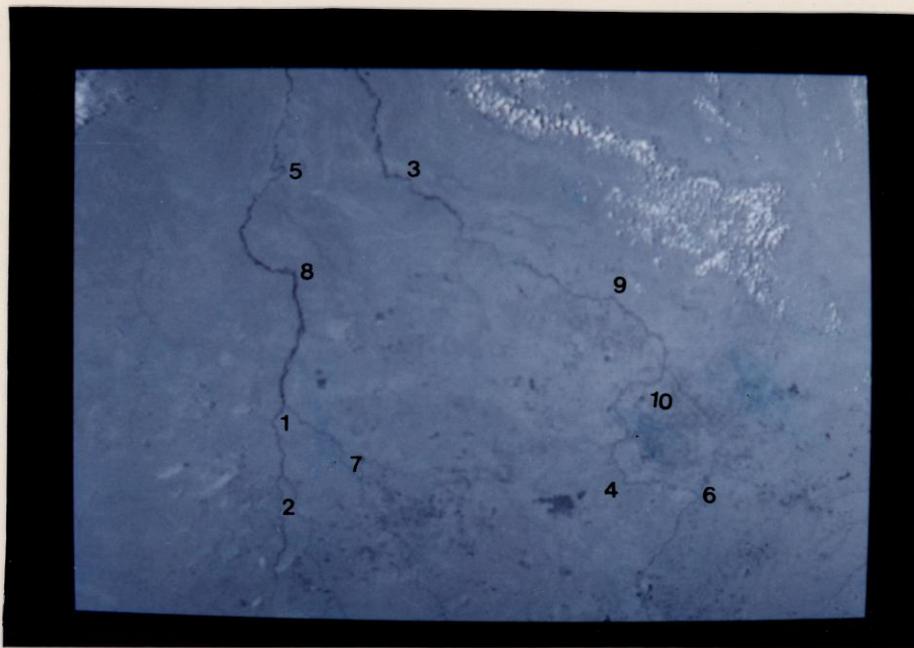
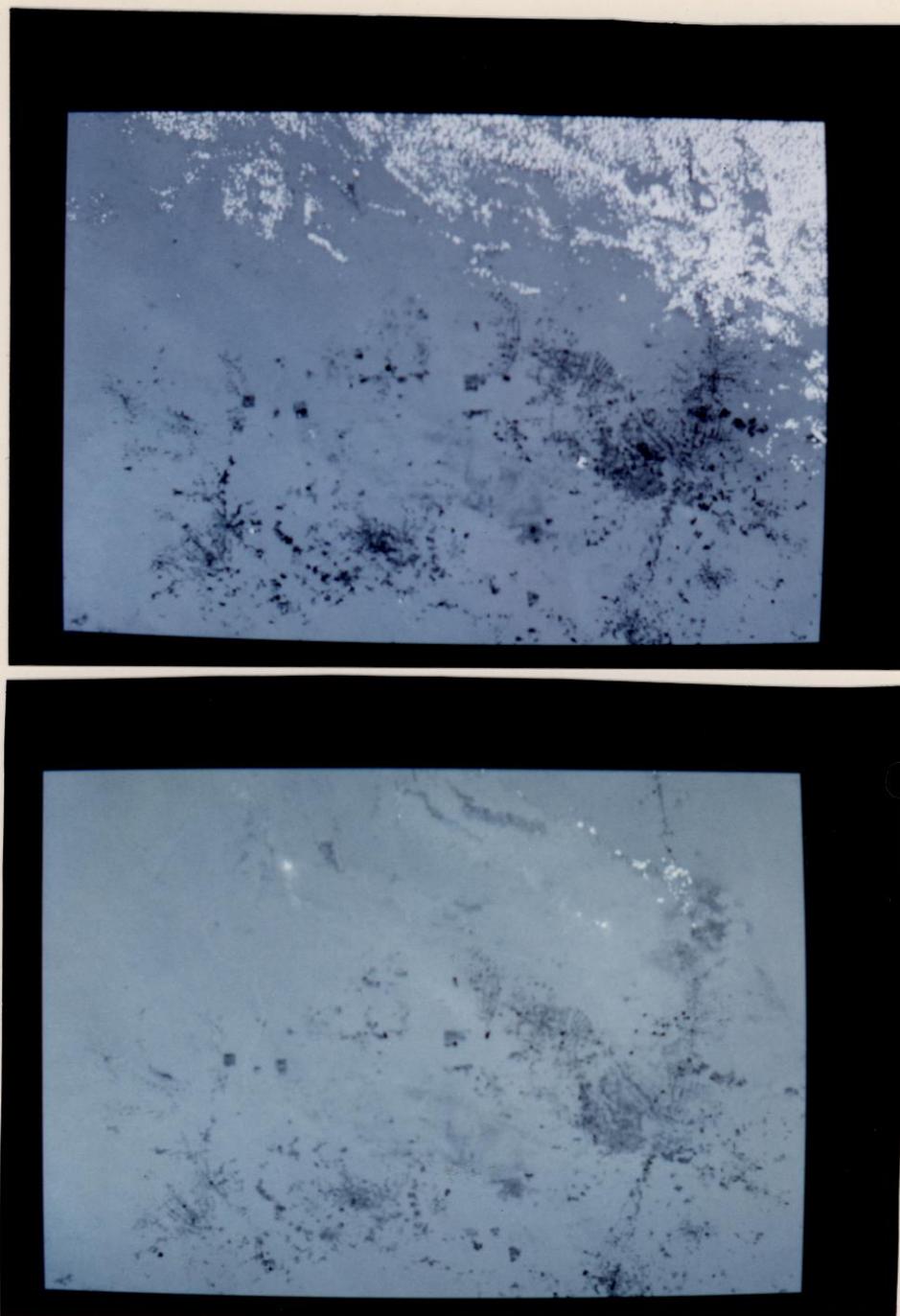


Fig. 4.1 - Imagem AVHRR banda 2 com a indicação dos pontos utilizados na verificação da precisão de localização.

Similarmente ao descrito por Amaral (1992), após a correção geométrica, as feições espaciais foram mantidas na imagem resultante. A Figura 4.2 mostra as imagens AVHRR corrigidas (banda 3), para cada uma das datas analisadas.



(continua)

Fig. 4.2 - Imagens AVHRR banda 3: (a) imagem de setembro de 1989; (b) imagem de julho de 1990; e (c) imagem de setembro de 1990.

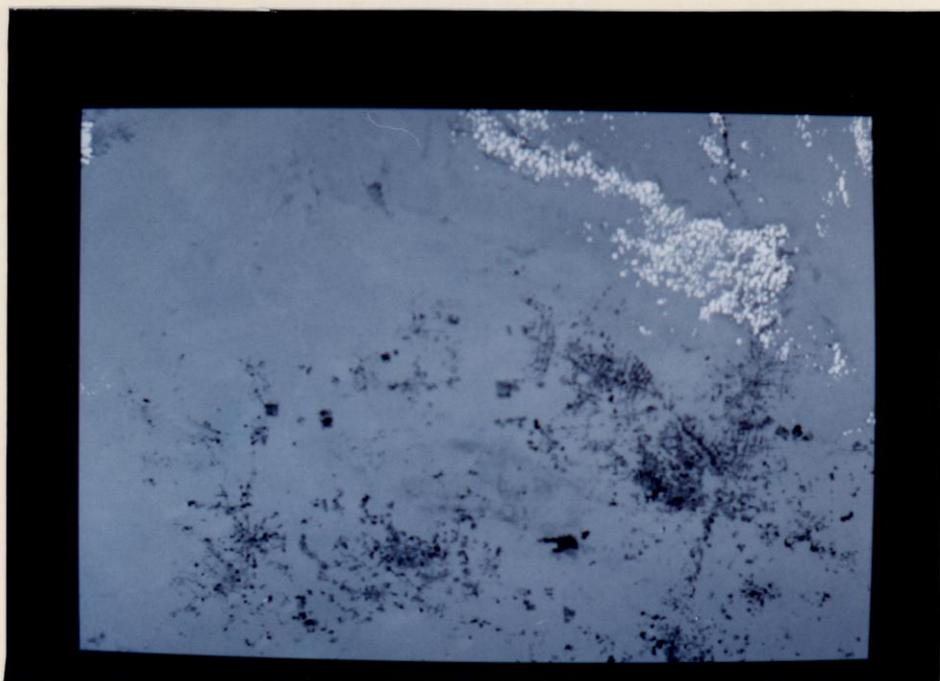


Fig. 4.2 - Conclusão.

4.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS AVHRR

Apesar do procedimento utilizado para minimizar diferenças radiométricas existentes entre as imagens AVHRR, conforme descrito no item 3.3.2.2, as diferenças nos níveis de cinza das mesmas feições, nas diferentes imagens, ainda resultaram em classificações diferentes para elas. Esta situação possivelmente resultou das imagens terem sido tomadas em datas e horários diferentes, e conseqüentemente com elevação solar, composição atmosférica, umidade do solo e da vegetação e estado fenológico da vegetação diferentes.

A Figura 4.3 apresenta os histogramas das imagens de setembro de 1989, julho de 1990 e setembro de 1990

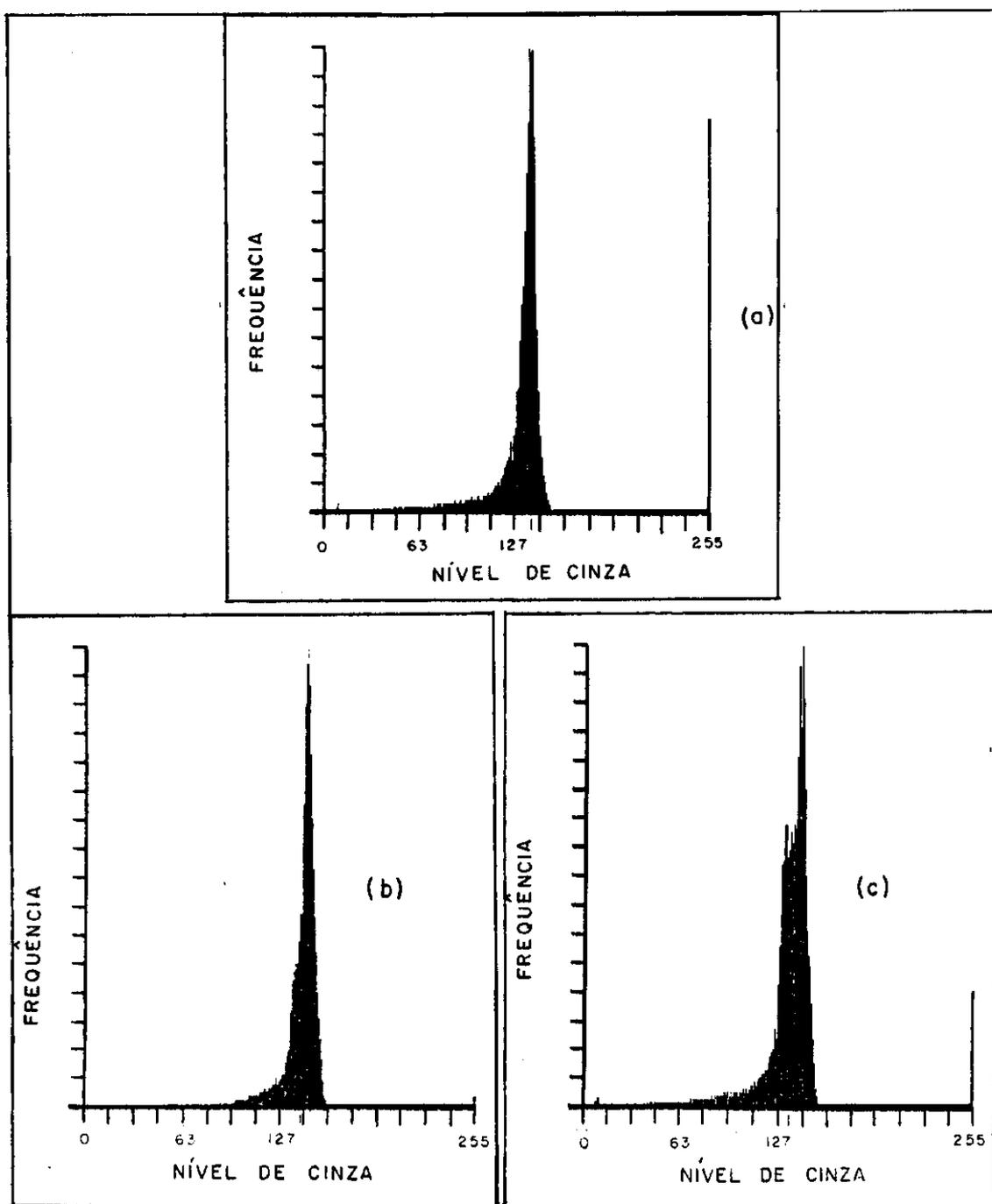


Fig.4.3 - Histogramas das imagens AVHRR banda 3: (a) setembro de 1989; (b) julho de 1990; e, (c) setembro de 1990.

A Tabela 4.2 mostra a variação da resposta radiométrica da banda 3 para a classe floresta nas imagens AVHRR de setembro de 1989, julho de 1990 e setembro de 1990.

TABELA 4.2 - VARIAÇÃO DA RESPOSTA RADIOMÉTRICA DA BANDA 3 PARA FLORESTA EM TRÊS IMAGENS AVHRR DIFERENTES

Amostras de Floresta	Valores Radiométricos nas imagens AVHRR		
	Imag. SET/89 *	Imag. JUL/90	Imag. SET/90
1	121	147	136
2	120	154	131
3	118	136	116
4	132	152	141
5	111	128	113
6	128	142	131
7	136	146	142
8	122	131	122
9	124	138	127
10	120	138	134
Média	123,2	141,2	129,3
Desv. Padrão **	7,2	8,6	9,8

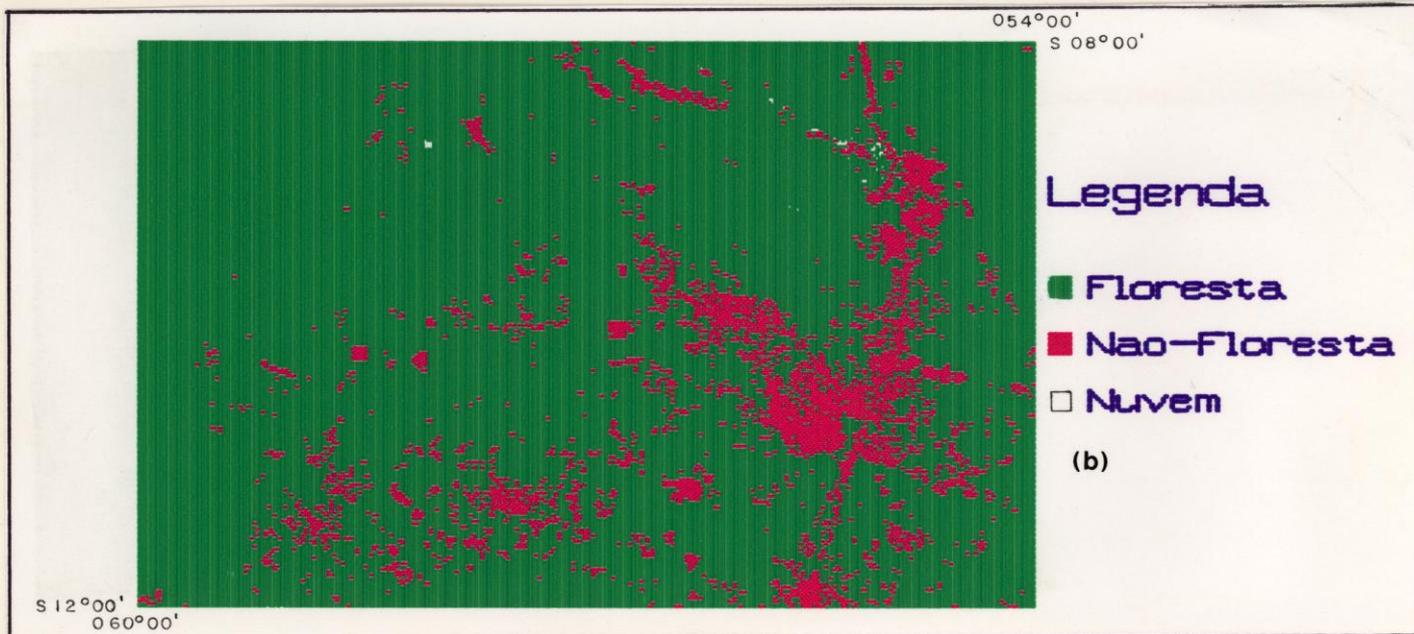
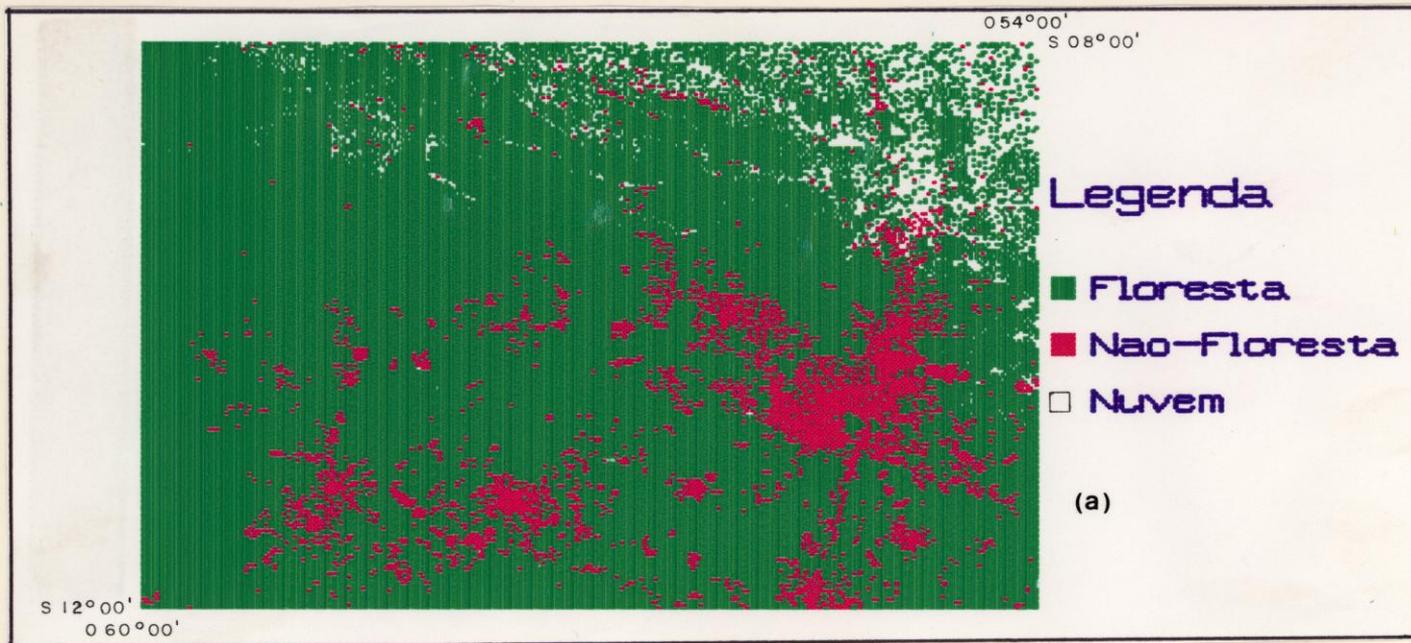
* Imag. = Imagem.

** Desv. Padrão = Desvio Padrão

Os valores de nível de cinza (NC) dos diferentes locais de floresta, escolhidos como amostras, nas imagens AVHRR foram obtidos através da função "Cálculo de Estatísticas do SITIM. Para cada imagem foi obtido um valor

mínimo de NC representante de cada amostra da classe floresta. Este valor mínimo foi então utilizado na classificação por fatiamento, e neste caso foram os valores adquiridos no "ponto 5". Os valores inferiores ao valor mínimo para floresta foram considerados pertencentes a classe Não-Floresta, ou seja, desmatamento e cerrado. Cabe observar que na banda 3 a escala de níveis de cinza é invertida, ou seja, níveis menores correspondem à temperaturas mais altas, portanto a referência para discriminação da classe floresta deve ser dada pelos menores valores desta classe.

As imagens classificadas são apresentadas na Figura 4.4.



(continua)

Fig. 4.4 - Imagens AVHRR classificadas: (a) setembro de 1989; (b) julho de 1990; e (c) setembro de 1990.

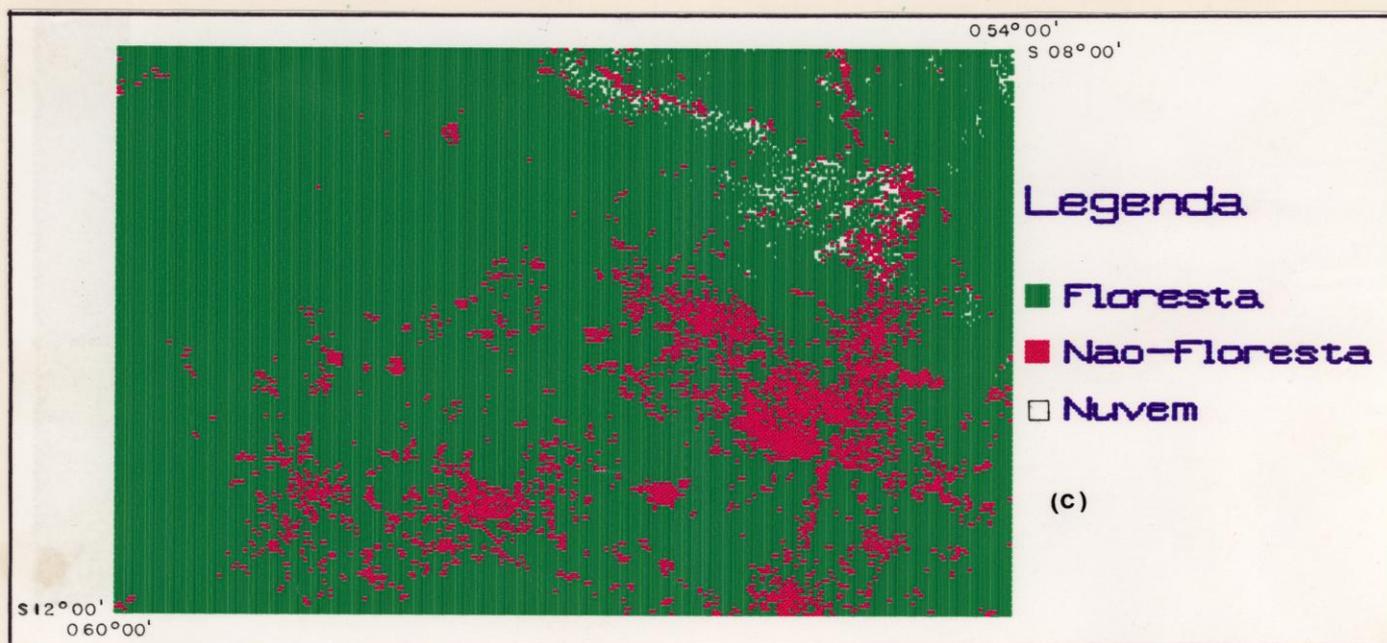


Fig. 4.4 - Conclusão.

4.3 - MANIPULAÇÃO DOS DADOS NO SGI

As imagens classificadas foram cruzadas no SGI segundo a regra de cruzamento descrita no item 3.3.3.1.

As imagens resultantes dos cruzamentos podem ser observadas na Figura 4.5.

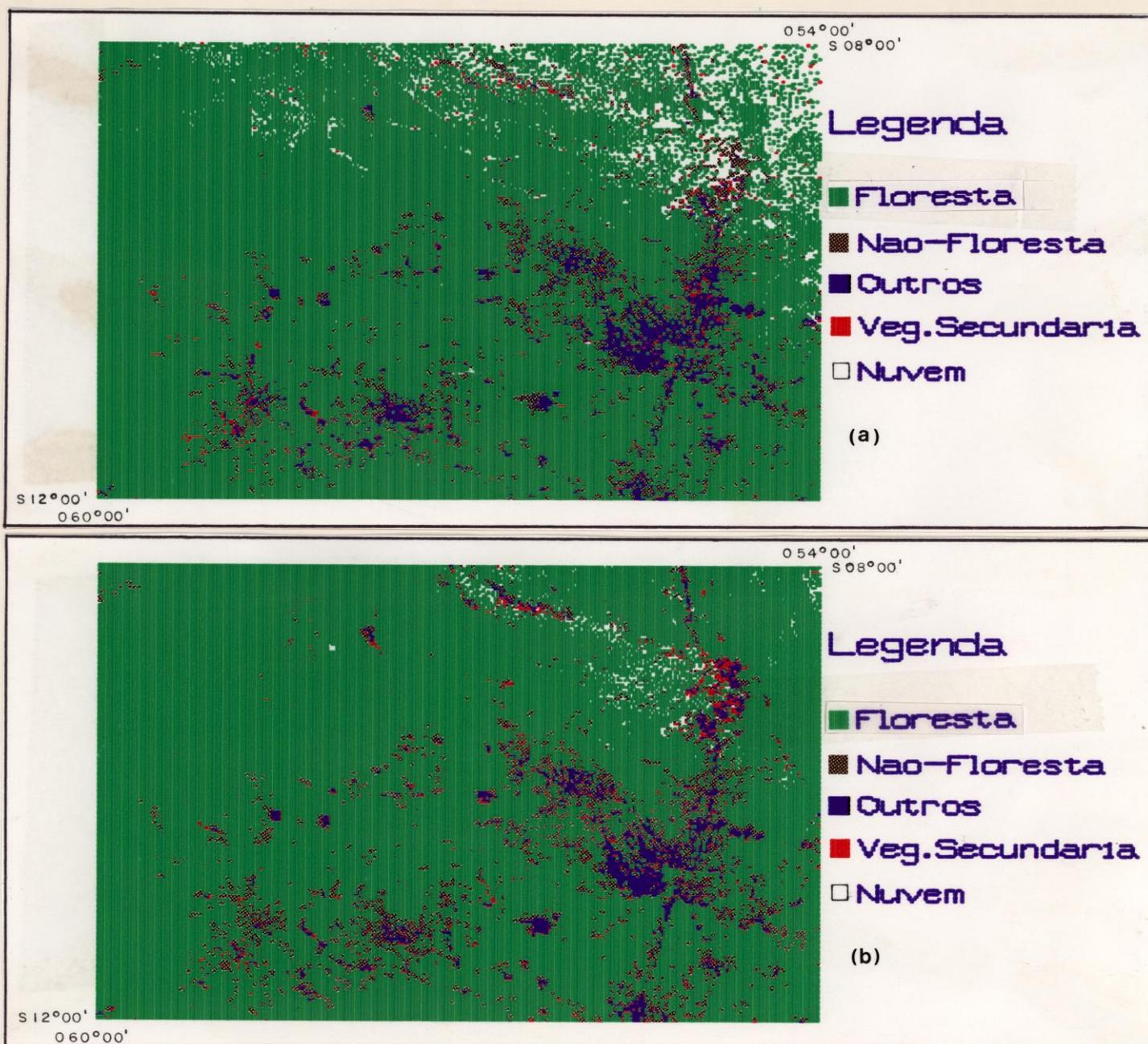


Fig. 4.5 - Imagens AVHRR resultantes dos cruzamentos no SGI: (a) imagem de setembro de 1989 com setembro de 1990; e (b) imagem de julho de 1990 com setembro de 1990.

4.3.1 - AFERIÇÃO DOS RESULTADOS

Conforme descrito no item 3.3.3.2, a aferição dos resultados foi realizada através da análise puntual e visual dos dados de saída AVHRR e do cálculo de área total alterada nas cinco amostras, a partir de informações geradas com dados TM.

4.3.1.1 - ANÁLISE PUNTUAL

As Tabelas 4.3 e 4.4, mostram os resultados obtidos para os locais de desmatamento de 1990, localizados nas cartas TM, e sobrepostos às áreas amostrais da imagem resultante AVHRR (Figura 3.1b).

TABELA 4.3 - RESULTADOS OBTIDOS DA IMAGEM AVHRR RESULTANTE DO CRUZAMENTO DA IMAGEM DE SETEMBRO DE 1989 COM A DE SETEMBRO DE 1990

Cartas TM	N ^o polígonos por Carta TM	Classes na Imagem AVHRR Resultante				
		Não Flo- resta	Veget. Secun- dária	Flo- resta	Outros	Nuvem
274	40	25	02	10	03	-
297	40	17	03	19	01	-
298	43	17	09	13	04	-
319	40	20	05	13	02	-
320	53	27	04	21	01	-
Total	216	106	23	76	11	-
%	100,0	49,1	10,6	35,2	05,1	-

TABELA 4.4 - RESULTADOS OBTIDOS DA IMAGEM RESULTANTE DO CRUZAMENTO DA IMAGEM DE JULHO DE 1990 COM A DE SETEMBRO DE 1990

Cartas TM	N ^o polígonos por Carta TM	Classes na Imagem AVHRR Resultante				
		Não Flo- resta	Veget. Secun- dária	Flo- resta	Outros	Nuvem
274	45	33	01	10	01	-
297	40	19	06	14	01	-
298	44	24	06	14	-	-
319	40	25	02	11	02	-
320	52	24	07	19	02	-
Total	221	125	22	68	06	-
%	100,0	56,6	9,9	30,8	02,7	-

Dos 216 locais de desmatamentos identificados nos mapas TM, a imagem AVHRR resultante do cruzamento das imagens de setembro de 1989 com setembro de 1990, registrou 106 (49,1%), conforme a mostra a Tabela 4.3. Para a imagem AVHRR resultante do cruzamento da imagem de julho com a de setembro de 1990, dos 221 locais de desmatamentos analisados, 125 (56,6%) foram também registrados pela imagem AVHRR resultante (Tabela 4.4).

Os novos locais de desmatamento de 1990, observados nas cartas TM, e que foram classificados como floresta na imagem AVHRR, estão relacionados com o tamanho dos polígonos, pois polígonos menores que 3,1 km² não foram sempre identificados na imagem AVHRR. Muitos destes polígonos tinham dimensões menores que a resolução do AVHRR (de 1,2 km² a 2,0 km², dependendo do ângulo de varredura), considerando o tamanho total da área de estudo.

Os pontos localizados em vegetação secundária, não foram identificados na imagem AVHRR, mas estavam na borda de antigos desmatamentos, os quais na imagem com data anterior ainda foram considerados como desmatamento e na imagem tomada posteriormente já apresentaram padrão semelhante ao de floresta.

Alguns pontos se localizaram como "outros", ou seja, cerrado ou desmatamento antigo. Isto justifica-se pelo fato de estarem também próximos à desmatamentos antigos ou cerrado. Na verdade, esses locais de desmatamento não foram registrados pelo AVHRR. O deslocamento entre as feições devido a existência de erro na geometria interna das imagens provocou a localização de alguns pontos em classes geograficamente próximas.

Um outro fator que introduziu erro no posicionamento dos pontos adquiridos nas cartas TM em relação a esses mesmos pontos nas imagens AVHRR foi a imprecisão do sistema (SGI) quanto a conversão de projeção. Houve problemas de "software" na conversão dos dados TM em projeção UTM para a cilíndrica eqüidistante pelo SGI no projeto com as imagens AVHRR. Para que fosse possível ajustar os pontos obtidos de dados TM na imagem AVHRR no SGI, foi necessário se calcular um outro referencial para a imagem AVHRR, fora do sistema.

Para as imagens com datas de julho e setembro de 1990, observou-se um resultado melhor no que se refere a quantidade de pontos reconhecidos como desmatamento na imagem AVHRR resultante. Isto, provavelmente, ocorreu em função do melhor registro entre as imagens.

A Tabela 4.5 mostra os resultados observados nas imagens AVHRR resultantes, considerando-se apenas 50 polígonos de desmatamentos das cartas TM, com área superior a 3,1 km². Na Tabela, SS refere-se a imagem resultante do cruzamento da imagem de setembro de 1989 com setembro de 1990, e JS a imagem de julho de 1990 com setembro de 1990.

TABELA 4.5 - PORCENTAGEM DE POLÍGONOS MAIORES QUE 3,1 KM² CORRETAMENTE IDENTIFICADOS NAS IMAGENS AVHRR

Cartas TM	N ^o Polígonos por carta TM	Imagens AVHRR Resultantes	
		ACERTOS	
		SS	JS
274	9	8	9
297	7	6	7
298	7	6	7
319	10	10	10
320	17	11	12
Total	50	41	45
%	100,0	82,0	90,0

Enquanto muitos polígonos pequenos foram identificados nas imagens AVHRR, alguns polígonos maiores que 3,1 km² não o foram. Observando-se as imagens TM constatou-se que os polígonos grandes não identificados nas imagens AVHRR, principalmente na região delimitada pela carta 320, não correspondiam a desmatamentos do tipo corte raso, mas possivelmente a desmatamentos seletivos. Nestes casos, uma parte significativa da floresta é deixada intacta, verificou-se na imagem TM apenas uma mudança discreta na textura e na cor em relação a floresta original.

A Tabela 4.6 mostra a quantidade de "falsos alarmes" encontrados nas imagens AVHRR. Os "falsos alarmes" correspondem às áreas consideradas desmatamento em 1990 nas imagens AVHRR, e que não foram encontradas nas cartas geradas com dados TM. Na Tabela, f.al. refere-se a "falsos alarmes".

TABELA 4.6 - QUANTIDADE TOTAL DE POLÍGONOS DE DESMATAMENTO DE 1990 E PORCENTAGEM DE "FALSOS ALARMES", OBSERVADOS NAS IMAGENS AVHRR RESULTANTES

Áreas Amostrais AVHRR	Imagens AVHRR Resultantes					
	SS			JS		
	total	f.al.	%	total	f.al.	%
274	222	58	26,1	230	53	23,0
297	94	13	13,8	92	24	25,5
298	134	36	26,8	105	34	32,4
319	139	55	39,5	135	47	34,8
320	218	99	45,4	202	90	44,5
Total	807	261		764	248	
% Total	100,0	32,3		100,0	32,4	

Aproximadamente 10% desses "falsos alarmes" ocorreram em áreas de cerrado. Apesar das áreas de cerrado não terem sido verificadas quanto à ocorrência de desmatamento, alguns locais em áreas de cerrado foram considerados floresta na primeira data e não-floresta na segunda. Isto talvez possa ser explicado pelas diferenças radiométricas entre as imagens (que interferiram na classificação), ou mesmo por possíveis alterações ocorridas na região. Portanto, descartando-se os "falsos alarmes" em áreas de cerrado, a porcentagem de erro reduziu-se para cerca de 22%.

Outros fatores podem ter causado esses "falsos alarmes", como, por exemplo, problemas de registro e de diferenças radiométricas entre as imagens, e confusão na classificação, especialmente onde ocorreram pixels misturados (Cross, 1991) de "bordas" no contato floresta-desmatamento e floresta-cerrado, com tendência a serem classificados como desmatamento. Como pode ser observado na Tabela 4.6, a maior incidência de desmatamentos ocorreu nas regiões delimitadas pelas cartas 274 e 320, onde ocorreram os "falsos alarmes" também em maior quantidade. Através de análise visual, verificou-se ainda que dos 10% de "falsos alarmes" ocorridos em área de cerrado, a maior parte foi registrada na região delimitada pela carta 298, onde se verificou a maior ocorrência deste tipo de vegetação, dentre as cinco áreas analisadas.

Deve-se ainda considerar o fato que, das 35 imagens TM utilizadas no mapeamento de referência (Tabela 3.2), apenas 3 imagens cobrem todo o período analisado nas imagens AVHRR (Tabela 3.1). Portanto, podem ter ocorrido na região, desmatamentos posteriores à passagem TM registrada.

4.3.1.2 - ANÁLISE DO CÁLCULO DE ÁREA

A análise do cálculo de área foi realizada comparando-se a área total desmatada em 1990, calculada nas áreas amostrais da imagem AVHRR resultante do cruzamento no SGI das imagens de datas de setembro de 1989 e setembro de 1990 (Figura 4.6), com as informações de área total desmatada para 1990 obtidas dos relatórios das cartas TM do Sistema de Informações "AMAZONIA" cedidos pelo INPE. A Tabela 4.7 resume os resultados obtidos no cálculo de área.

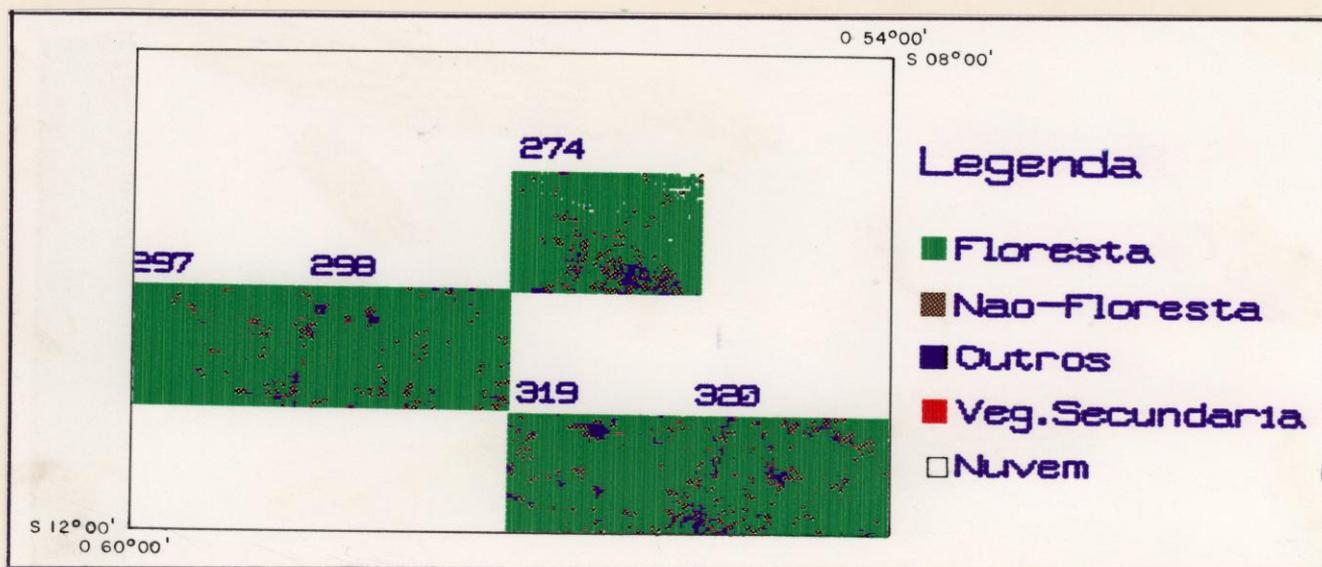


Fig. 4.6 - Áreas amostrais da imagem AVHRR resultante.

TABELA 4.7 - ÁREA TOTAL DESMATADA (EM KM²) NAS CINCO ÁREAS AMOSTRAIS CALCULADAS A PARTIR DE DADOS TM DE 1990 E AVHRR DE 89/90 E CORRESPONDENTE DIFERENÇA

Áreas Amostrais	TM	AVHRR	Diferença AVHRR - TM
274	73,3741	862	788,6259
297	209,3123	320	110,6877
298	90,3896	475	384,6104
319	107,1519	543	435,8481
320	156,6556	811,0	654,3444

Conforme pode ser observado na Tabela 4.7, a imagem resultante AVHRR indicou área desmatada em 1990 bem maior que o real. Baseado na análise visual das imagens AVHRR espectrais, classificadas e as cruzadas no SGI, isto pode ser explicado da seguinte forma:

- algumas alterações antigas foram classificadas como floresta na imagem de setembro de 1989 e como desmatamento na imagem de setembro de 1990, aumentando a área total desmatada em 1990;
- apesar da imagem resultante mostrar a diferença entre as datas, nem todas as áreas de cerrado foram incluídas na classe "outros", ou seja, na classe onde estão os desmatamentos antigos e os cerrados. Semelhantemente ao que ocorreu com as alterações antigas, algumas áreas de cerrado foram classificadas como floresta na imagem de setembro de 1989 e como desmatamento na imagem de setembro de 1990. Logo, na imagem resultante aparecem como novo desmatamento, aumentando ainda mais a área para desmatamento de 1990.

A ocorrência de confusão na classificação advém das diferenças radiométricas encontradas nas imagens de diferentes datas. A ocorrência de pixels misturados também contribuiu bastante para o aumento de área desmatada, pois observou-se uma tendência de classificação desses pixels misturados na classe não-floresta. A influência desses pixels misturados depende da proporção que eles ocorrem na imagem (Cross, 1991), o que justifica, por exemplo, o resultado do cálculo de área da carta 274 (Alta Floresta), tendo em vista a quantidade de bordas existentes na imagem nesta região.

- Um outro fator que colaborou para o aumento da área desmatada em 1990 nas imagens AVHRR, foi o fato de haver imperfeições de registro entre as imagens, ou seja, pequenos deslocamentos entre as feições, os quais geram desmatamentos irreais.
- O tamanho do pixel AVHRR (de $1,1 \text{ km}^2$) também justifica o resultado dos cálculos de áreas exageradas no AVHRR, uma vez que um desmatamento ou queimada de $30\text{m} \times 30\text{m}$ no TM, pode ser observado com cerca de 1 km^2 no AVHRR.

Para que o cálculo de área gere melhores resultados, faz-se necessário minimizar os problemas de diferenças radiométricas entre as imagens. As imagens devem possuir histogramas bem semelhantes após ajustes radiométricos, e devem passar por um registro adicional para melhorar ainda mais a geometria interna das imagens. Isto, tendo em vista a possibilidade de se obter bons resultados no cálculo de área com o dados AVHRR, conforme demonstrado por Amaral (1992). A autora obteve com a classificação por fatiamento de níveis de cinza da banda 3 do AVHRR, uma superestimativa de 5% da área total de floresta e 2% de subestimativa de área da classe desmatamento + cerrado, na região da Serra do Roncador, MT.

CAPÍTULO 5CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES5.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu e avaliou uma metodologia simples e de custo relativamente baixo para a criação de um sistema de monitoramento de desmatamentos da Floresta Amazônica, tendo imagens AVHRR/NOAA como fonte de dados e um Sistema de Processamento de Imagens e de Informações Geográficas na manipulação dessas imagens. Procurou-se utilizar a banda 3 termal (3,5um a 3,9um) do sensor AVHRR como ferramenta de alarme para indicar suspeitas áreas de desmatamento.

Na análise puntual de locais de desmatamentos de diferentes tamanhos selecionados nas imagens, os resultados obtidos com as imagens com datas de um ano de diferença, no caso, setembro de 1989 e setembro de 1990, mostraram que 49,1% dos 216 locais de desmatamento, obtidos de cartas geradas a partir de dados TM, foram corretamente localizados em áreas de desmatamento na imagem resultante AVHRR (SS). 50,9% desses locais corresponderam erroneamente a outras classes (floresta, vegetação secundária, antigos desmatamentos, e cerrado). Nenhum desmatamento foi confundido com a classe nuvem.

Para imagens cruzadas com datas que representam aproximadamente o início e fim da estação seca da região (julho e setembro de 1990 - JS), verificou-se 56,6% de acerto de localização dos 221 pontos na imagem AVHRR. 43,4% foram localizados erroneamente nas outras classes, exceto na classe nuvem.

Na análise puntual, levando-se em consideração apenas polígonos maiores que $3,1 \text{ km}^2$, observou-se que dos 50 pontos analisados para a imagem SS obteve-se 82% de acerto na localização de novos desmatamentos. Para a imagem JS obteve-se 90% de acerto, sugerindo um erro neste tipo de análise, de 10% a 20%.

Considerando-se o total de polígonos caracterizados como novos desmatamentos nas imagens AVHRR, foi verificado um erro em torno de 32% com "falsos alarmes" (falsos indícios de novos desmatamentos). Excluindo-se os "falsos alarmes" ocorridos em áreas de cerrado o erro reduz-se para cerca de 22%.

No cálculo de área desmatada para 1990, com dados AVHRR, houve superestimativa acima de 100%. Foi observado que para um resultado mais satisfatório na estimativa de áreas desmatadas, deveriam ser corrigidos ainda alguns problemas no registro, na radiometria das imagens, problemas de pixels misturados, e excluídos os cerrados das áreas analisadas.

A nova metodologia desenvolvida mostrou que os dados do sensor AVHRR também podem ser utilizados diretamente na detecção de mudanças na cobertura florestal em florestas tropicais. Com esta metodologia de rápida execução, torna-se possível a detecção de desmatamentos logo após sua ocorrência e não após a queimada a ele associada.

Apesar desta metodologia apresentar limitações inerentes à radiometria diferenciada de imagens adquiridas em diferentes épocas, ao registro entre imagens, e também à estimativa de áreas desmatadas, fica estabelecida a possibilidade do uso de um sistema semi-automático de detecção de mudanças na cobertura florestal da Floresta Amazônica através de imagens AVHRR, desde que sejam estabele-

cidos critérios de precisão.

5.2 - RECOMENDAÇÕES

Seria importante desenvolver um trabalho que analisasse cada uma das fontes de erros observadas e avaliasse sua influência sobre os resultados de análises multi-temporais com as imagens AVHRR. Neste sentido recomenda-se:

- 1) Poderia ser realizado trabalho com a metodologia desenvolvida nesta dissertação, utilizando-se a banda 4 do AVHRR, para que fosse verificado se haveria melhoria quanto aos problemas de equalização dos níveis de cinza das imagens, em virtude da radiometria, uma vez que segundo Cross (1991) esta banda sofre menos influência de problemas de calibração do que a banda 3. Outra alternativa seria o desenvolvimento inédito de programas de correção radiométrica e atmosférica, para aplicação nas imagens AVHRR, banda 3.
- 2) Os dados obtidos das imagens AVHRR foram analisados somente em relação a informações de dados TM. Não foram avaliados com outra fonte de referência e portanto seria importante que fosse realizado um trabalho para área menor, com verificação de campo de locais suspeitos de desmatamento, e se possível com a utilização de um GPS ("Global Position System"). Assim, seria possível avaliar o erro de posicionamento de locais de novos desmatamentos nas imagens AVHRR, ocorridos relativamente próximos às áreas de novos desmatamentos nas imagens TM, mas que tendo em vista o critério aqui adotado, não foram considerados como acerto na classe "não-floresta". Há de se levar em consideração ainda, o

fato de existir erro de geometria interna nas imagens TM.

- 3) Os resultados obtidos com o algoritmo de correção geométrica das imagens AVHRR foram bastante satisfatórios. Entretanto, seria importante ainda o desenvolvimento de um algoritmo que melhore o desempenho da análise temporal, corrigindo problemas de geometria interna, que se apresentam como distorções não uniformes nas imagens.
- 4) Sugere-se que seja desenvolvido um trabalho que envolva análise do comportamento espectral da vegetação secundária, através de uma seqüência de imagens AVHRR, uma vez que foi observada neste trabalho a possibilidade de detecção deste tipo de vegetação.
- 5) Seria necessário também a revisão dos programas de conversão de projeção do SIG/INPE, uma vez que houve problemas de localização de pontos na projeção UTM, após serem convertidos para a projeção cilíndrica eqüidistante, em pontos obtidos dos mapas TM.

A utilização de dados multi-temporais de imagens AVHRR seria valiosa na composição de níveis complementares de verificação de dados em grandes regiões, como por exemplo, a Amazônia. Ao invés de se utilizar imagens TM de toda a região para a verificação de alterações na floresta, o AVHRR seria uma alternativa de baixo custo para o monitoramento ou mesmo vigilância da região. As imagens TM seriam utilizadas principalmente naquelas áreas onde as imagens AVHRR indicassem tendências de desmatamentos mais intensos, para estudos e observações mais detalhadas.

Sugere-se portanto que seja dada continuidade a esta pesquisa, no sentido de aperfeiçoar e operacionalizar um "Sistema de Alerta de Desmatamentos para a Amazônia" com dados AVHRR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alho, C.J.R. Manejo e conservação da natureza. In: **Cara-jás: desafio político, ecologia e desenvolvimento**. São Paulo, Brasiliense S.A., 1986. cap.19, p. 560-587
- Alves, D.S.; Erthal, G.J.; Câmara Neto, G.; Felgueiras, C.A.; Paiva, J.; Oliveira, E.; Dias, L.A.V.; Godoy Jr, M.; Abrahão, A. Sistemas de informação geográfica. In: Congresso Nacional de Informática, 21., Rio de Janeiro, agosto, 1988. **Anais**. Rio de Janeiro, Sucesu, 1988. p. 915-920.
- Alves, D.S. Sistemas de informação geográfica. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo, 23-25 maio, 1990. **Anais**. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. v.1, p. 66-78.
- Alves, D.S.; Meira Filho, L.G.; D'Alge, J.C.L., Mello, E.K.de, Moreira, J.C.; Medeiros, J.S.de The Amazonia Information System. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 17., Washington, 03-14 Aug., 1992. **Proceedings**. ISPRS, 1992. p.259-266.
- Amaral, S. **Imagens do sistema sensor AVHRR/NOAA na detecção e avaliação de desmatamentos na floresta Amazônica - relações com dados do sistema TM/Landsat**. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1992. 195 p. (INPE-5501-TDI/516).

- Andrade, V.M.B. **Classificação de imagens de alta resolução usando atributos de textura.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1990. 71 p. (INPE-5068-TDL/407).
- Arai, N. **Programa LENOAA.** São José dos Campos, INPE, 1991.
- Ayres, J.M.; Best, R. Estratégias para a conservação da fauna amazônica. **Supl. Acta Amazônica**, 9(4):81-101, 1979.
- Barnes, J.C.; Smallwood, M.D. **Tiros-N series direct readout services users guide.** Washington D.C., NOAA/NESS, 1982.
- Bowers, S.A.; Hanks, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, 100(2):130-138, 1965.
- Bunyard, P. The significance of the Amazon Basin for global climatic equilibrium. **The Ecologist**, 17(4/5):139-141, 1987.
- Burrough, P.A. **Principles of geographical information systems of land resources assessment.** Oxford, Clarendon Press, 1987. 193 p.
- Câmara, I. de G. Conservação da natureza e legislação. In: **Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento.** São Paulo, Brasiliense S.A., 1986. cap.19, p. 560-587.

- Cihlar, J.; ST.Laurent, L.; Dyer, J.A. Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. **Remote Sensing of Environment**, 35:279-298, 1991
- Congalton, R.G. A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54(5):593-600, 1988.
- Cross, A. AVHRR as a data source for a GIS: deforestation in Amazonia. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, D.C., May 20-24, 1990. **Proceedings**. S.l., s.ed., 1990a. p. 223-226.
- Cross, A. **Tropical deforestation and remote sensing: the use of NOAA/AVHRR data over Amazonia**. Geneve, UNEP/GRID, 1990b. Final report to the Comission of the European Communities (article B946/88).
- Cross, A. **Tropical forest monitoring using AVHRR: towards an automated system for change detection**. Geneve, UNEP/GRID, 1991. Final report to the Comission of the European Communities. 44 p.
- Crosta, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoria-mento remoto**. Campinas, IG/UNICAMP, 1992. 170p.
- Dutra, L.V.; Souza, R.C.M.; Ii, F.A.M.; Moreira, J.C. **Aná-lise automática de imagens multiespectrais**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, agosto 1981. (INPE-2212-MD/009).

- Ehlers, M.; Edwards, G.; Bédard, Y. Integration of remote sensing with geographic information system: a necessary evolution. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55(11):1619-1627, Nov. 1989.
- ENGESPAÇO. SITIM. São José dos Campos, s.d.
- Erthal, G.J.; Velasco, F.R.D.; Mascarenhas, N.D.D. **Um sistema para registro translacional de segmentos de imagens LANDSAT**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, junho 1983. (INPE-2785-PRE/351).
- Erthal, G.J.; Alves, D.S.; Câmara Neto, G. **Modelo de dados geo-relacional: uma visão conceitual de um sistema geográfico de informações**. Apresentado no Primeiro Simpósio de Computação Gráfica e Processamento de Imagem, Rio de Janeiro, 19-20 abril 1988. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, junho 1988b. (INPE-4612-PRE/1335).
- Erthal, G.J.; Oliveira, M.O.B.de; Felgueiras, C.A.; Câmara Neto, G.; Paiva, J.A.deC. **O banco de dados geográficos do INPE**. Apresentado no Primeiro Simpósio Brasileiro de Bancos de Dados, Rio de Janeiro, 11-12 abril 1986. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, agosto 1988a. (INPE-4636-PRE/1348).
- Felgueiras, C.A.; Erthal, G.J.; Paiva, J.A.de C.; Alves, D.S. Metodologias de integração de dados em sistemas de informações geográficas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Manaus, 24-29 julho, 1990. **Anais**. INPE, 1990, v. 3, p. 732-735.
- Felgueiras, C.A. **Programa ENT_IMA**. São José dos Campos, INPE, 1993.

- Fearnside, P.M. Desenvolvimento da floresta Amazônica: problemas prioritários para formulação de diretrizes. **Supl. Acta Amazônica**, 9(4):123-129, 1979.
- Fearnside, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: the rates and causes of forest destruction. **The Ecologist**, 19(6):214-218, 1989.
- Fernandes, A.E. **Programa CNOAA8**. São José dos Campos, INPE. 1990.
- _____ **Programa NAVE**. São José dos Campos, INPE. 1992a.
- _____ **Programa Le_PONTO**. São José dos Campos, INPE. 1992b.
- _____ **Programa CORTELA**. São José dos Campos, INPE. 1993.
- Fernandes, A.E.; Setzer, A.W.; Pereira, M.C. **Programa DESFLO**. São José dos Campos, INPE. 1993.
- Figueiredo, D.C. **Sistema de obtenção de índice de vegetação para a América do Sul por processamento digital de imagens NOAA/AVHRR**. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1990. p. 71. (INPE-5068-TDL/407).
- Foody, G.M. Incorporating remotely sensed data into a GIS: the problem of classification evaluation. **Geocarto International**, 3(3):13-16, Sept. 1988.
- Gash, J.H.C., Shuttleworth, W.J. Tropical deforestation: albedo and surface-energy balance. **Climatic Change**, 19(1/2):123-133, 1991.

- Goldsmith, E.; Hildyard, N.; Bunyard, P. Editorial. Tropical forests: a plan for action. **The Ecologist**, 17(4/5):139-141, 1987.
- Goward, S.N.; Markham, B.; Dye, D.G.; Dulaney, W.; Yang, J. Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. **Remote Sensing of Environment**, 35:257-277, 1991.
- Gutman, G.G. Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. **Remote Sensing of Environment**, 35:121-136, 1991.
- Hay, A.M. Sampling designs to test land-use map accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 45(4):529-533, 1979.
- Hayes, L. The current use of Tiros-N series of meteorological satellites for land-cover studies. **International Journal of Remote Sensing**, 6(1):35-45, 1985.
- Holben, B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1417-1434, 1986.
- Hord, R.M.; Brooner, W. Land-use map accuracy criteria. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 42(5):671-677, 1976.
- Ii, F.A.M.; D'Alge, J.C.L.; Souza, R.C.M.de; Correia, V.R.de M.; Ii, S.S. Integração de imagens orbitais a uma base de dados cartográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 24-29 junho, 1990. **Anais**. São José dos campos, INPE, 1990, p. 250-254.

Ii, S.S. **Programa ESCREF**. São José dos Campos, INPE. 1988.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Departamento de Processamento de Imagens (INPE. DPI). **Manual do usuário do SITIM**. São José dos Campos, 1986.

_____. Departamento de Processamento de Imagens (INPE. DPI). **Manual do usuário do SIG**. São José dos Campos, 1989.

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

Jordan, G.A.; Erdle, T.A. Forest management and GIS - What have we learned in New Brunswick? **CISN Journal ACSGC**, 43(3):287-295, 1989.

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

Kerr, W.E. PGC: algumas sugestões em função de sua situação Amazônica. In: **Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento**. São Paulo, Brasiliense S.A., 1986. cap. 23, p. 621-629.

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/NESDIS, 1991. 1v.

Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York, John Wiley & Sons, 1979. 612p.

- Lloyd, D. Mapping vegetation for the Peters Atlas of the world using NOAA global vegetation index. In: Annual Conference of the Remote Sensing Society, 15., Bristol, 13-15 Sept., 1989. **Proceedings.**
- Malingreau, J.P.; Tucker, C.J. The contribution of AVHRR data for measuring and understanding global process: large-scale deforestation in the Amazon Basin. Pre-print. Presented at IGARSS'87.
- Malingreau, J.P., Tucker, C.J. Large scale deforestation in the southeastern Amazon basin of Brazil. **Ambio**, 17(1):49-55, 1988.
- Markham, B.L.; Townshend, J.R.G. Land cover classification as a function of sensor spatial resolution. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 15 ., Ann Arbor, MI, 11-15 May 1981. **Proceedings.** Ann Arbor, ERIM, 1981. V. 3, p. 1075-1089.
- Mascarenhas, N.D.A.; Velasco, F.R.D. **Processamento digital de imagens.** Buenos Aires, Kapelusz S.A., 1989.
- Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images:** an introduction. Chichester, John Wiley & Sons, 1987. 352 p.
- Medeiros, V.M.; Tanaka, K.; Yamazaki, Y. Sistema de navegação dos dados AVHRR dos satélites da série NOAA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, RS, 10-15 agosto. 1986. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1986, p. 464-471.
- Molion, L.C.B. The Amazonian forests and climatic stability. **The Ecologist**, 19(6):211-213, Nov./Dec., 1989.

Murphy, R.E. Forward. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1391-1393, 1986.

Myers, V.I. Soil, water and plant relations. In: National Academy of Sciences. **Remote sensing with special reference to agriculture and forestry**. Washington, 1970,. p. 253-297

_____ Remote sensing applications in agriculture. In: American Society of Photogrammetry (ASP). **Manual of Remote Sensing**. Falls Church, U.S.A., 1983. cap. 33, p.2111-2218

Nelson, R.; Holben, B. Identifying deforestation in Brazil using multiresolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(3):429-448, 1986.

Nobre, C.A., Sellers, P.J., Shukla, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, 4(10):957-988, 1991.

Novo, E.M.L.de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, Edgard Blucher, 1989. 308p.

Paixão, I.L. de S.C.,; Batmanian, G.J.; Assis, L.F.S. de Aspectos de planejamento ambiental. In: **Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento**. São Paulo, Brasiliense S.A., 1986. cap. 21, p. 591-607

Pereira, M.C. **Detecção monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e LANDSAT, e dados de aeronave**. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987. p. 71. (INPE-4503-TDL/326).

- Projeto RADAMBRASIL. **Folha SC-21 Juruena: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, DNPM, 1980. 460 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 20).
- Rankin, J.M. Manejo florestal ecológico. **Supl. Acta Amazônica, 9(4):115-122, 1979.**
- Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction.** Berlim, Germany, Springer-Verlag, 1986. 281 p.
- Sader, S.A.; Joyce, A.T. Global tropical forest monitoring. In: International Conference of the Remote Sensing Society and the Center of Earth Resources Management, London, 9-12 Sept., 1985. **Proceedings.** Whitstable, Whitstable Litho, 1985, p. 41-50.
- Sader, S.A.; Stone, T.A.; Joyce, A.T. Remote sensing of tropical forests: an overview of research and applications using non-photographic sensors. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56(10):1343-1351, Oct., 1990.**
- Sadowski, W.A.; malila, W.A.; Sarno, J.E.; Nelepka, R.F. The influence of multispectral scanner spatial resolution on forest feature classification In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 12 ., Ann Arbor, MI, 25-29, April 1977. **Proceedings.** Ann Arbor, ERIM, 1977. v. 2, p. 1279-1285
- Salati, E.; Ribeiro, M. de N.G. Floresta e clima. **Supl. Acta Amazônica, 9(4):15-22, 1979.**

- Salati, E. O clima atual depende da floresta. In: **Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia**. São Paulo, Brasiliense, 1983. cap.1, p.15-44.
- Salati, E.; Nobre, C.A. Possible climatic impacts of tropical deforestation. **Climatic Change**, 19(1/2):177-196, 1991.
- Santos, J.R.dos; Lee, D.C.L.; Shimabukuro, Y.E. Análise relacional dos dados AVHRR/NOAA e TM/Landsat na avaliação do antropismo em região de contato floresta/savana. In: Latin American Symposium on Remote Sensing, 2., Cuzco, Peru, 28 out. - 01 nov., 1991. **Annals**. SELPER, 1991, p. 941-949.
- Schneider, S.R.; McGinnis Jr, D.F.; Gatlin, J.A. **Use of NOAA/AVHRR visible and infrared data for land remote sensing**. Washington, D.C., NOAA/NESS, 1981. (NOAA Technical Report 84).
- Schowengerdt, R.A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. New York, Academic Press Inc., 1983. 249 p.
- Schubart, H.O.R. Ecologia e utilização das florestas. In: **Amazônia: desenvolvimento, integração e ecologia**. São Paulo, Brasiliense S.A., 1983. cap. 3, p. 101-143.
- Schubart, H.O.R.; Franken, W.; Luizão, F.J. Uma floresta sobre solos pobres. **Ciência Hoje**, 2(10):26-32, 1984.
- Schubart, H.O.R. Dinâmica dos Ecossistemas. In: **Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento**. São Paulo, Brasiliense, 1986. cap. 3, p. 30-58.

- Schwalb, A. **Modified version of the Tiros-N/NOAA A-G satellites series (NOAA E-J) - Advanced Tiros-N (ATN)**. Washington, D.C., NOAA/NESDIS, Feb. 1982. (NOAA Technical Memorandum NESS 116).
- Setzer, A.W.; Pereira, M.C. Operational detection of fires in Brazil with NOAA-AVHRR. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 24., Rio de Janeiro, 27-31 May, 1991. **Anais**. ERIM, 1991.
- Sioli, H. The effects of deforestation in Amazonia. **The Ecologist**, 17(4/5):134-138, 1987.
- Skole, D.L.; Chomentowski, W.H.; Nobre, C. **New estimates of Amazonian deforestation rates in the late 1970's using a geographic information system**. 14 p., datilografado em agosto de 1990.
- Skole, D.L.; Tucker, C.J. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, 260:1905-1909, 1993.
- Souza, R.C.M.de; 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, 23-25 maio, 1990. **Anais**. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990, v. 1, p. 168-173.
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M.F. **Physiochemical, site, and bidirecional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**. Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS)-Technical Report 111679, Indiana, 1980, 94 p.

Szekiela, K.H. **Satellite monitoring of the earth.** New York, John Wiley & Sons, 1988. 312 p.

Tardin, A.T.; Lee, D.C.L.; Santos, R.J.R.; Assis, O.R.; Barbosa, M.P.S.; Moreira, M.L.; Pereira, M.T.; Silva, D.; Santos Filho, C.P. **Subprojeto desmatamento: convênio IBDF/CNPQ-INPE.** São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1980, 49 p. (INPE-1649-RPE/103).

Tardin, A.T.; Santos, J.R. dos; Meira Filho, L.G.; Alves, D.S. **Estudo do desflorestamento na Amazônia: descrição metodológica.** 1991. 19 p. Datilografado.

Tarpley, J.D.; Schneider, S.R.; Money, R. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, 23:491-494, Mar. 1984.

The World Research Institute **World resources 1990-1991.** Oxford, University Press, 1990. 383 p.

Townshend, J.R.G. **The spatial resolution power of earth resources satellite: a review.** Greenbelt, NASA. GSFC, 1980. (NASA TM 82020).

Townshend, J.R.G.; Justice, C.O. Analysis of the dynamics of african vegetation using the normalized difference vegetation index. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1435-1445, 1986.

Tucker, C.J.; Holben, B.N., Goff, T.E. Intensive forest clearing in Rondônia, Brasil, as detected by satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, 15:255-261, 1984.

Tucker, C.J.; Sellers, P.J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1395-1416, 1986.

Valeriano, D.M. **Interações da radiação solar com a vegetação**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, setembro 1988. 136 p. (INPE-4697-MD/038).

Velasco, F.R.D.; Lima, U.M.B. de **Sistema SITIM - projeto preliminar do suporte lógico**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, agosto 1982. (INPE-2499-NTE/190).

Woodwell, G.M.; Houghton, R.A.; Stone, T.A.; Nelson, R.F.; Kovalick, W. Deforestation in the tropics: new measurements in the Amazon basin using LANDSAT and NOAA Very High Resolution Radiometer imagery. **Journal of Geophysical Research**, 92(D2):2157-2163, 1987.