

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5490-TDI/507

MONITORAMENTO DE QUEIMADAS NA REGIÃO DOS CERRADOS
UTILIZANDO DADOS AVHRR/NOAA CORRIGIDOS POR DADOS TM/LANDSAT

ALFREDO DA COSTA PEREIRA JÚNIOR

Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. João Roberto dos Santos, aprovada em maio de 1992.

INPE
São José dos Campos
Março 1992

528.711.7:634.034(251.3)

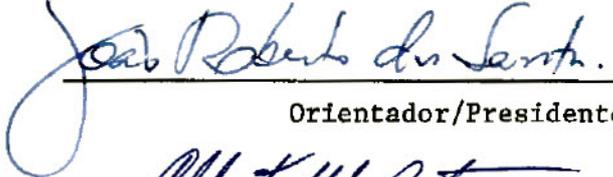
PEREIRA JR., A.C.

Monitoramento de queimadas na região dos Cerrados utilizando dados AVHRR/NOAA corrigidos por dados TM/Landsat. / A.C. Pereira Jr. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 220p. -- (INPE-5490-TDI/507)

1. Queimadas. 2. Cerrado. 3. Monitoramento. I. Título

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

Dr. João Roberto dos Santos


Orientador/Presidente

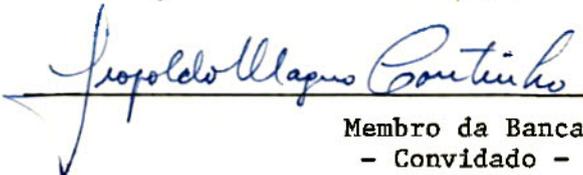
Dr. Alberto Waingort Setzer


Membro da Banca

Dr. Bráulio de Souza Dias


Membro da Banca
- Convidado -

Dr. Leopoldo Magno Coutinho


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Alfredo da Costa Pereira Júnior

São José dos Campos, 27 de março de 1992

Para

Adélia, Paulo Rogério e Iara, pelo amor
Alfredo, Alzira, Marcia, Marcos, por tudo

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. João Roberto dos Santos pela orientação.

A Alberto Waingort Setzer pela amizade, colaboração constante e disposição para o trabalho.

A Marcos da Costa Pereira pela amizade e colaboração no trabalho. Aos amigos do curso de pós-graduação pela amizade e ajuda constante, sem as quais não chegaria ao fim deste trabalho. Agradecimento especial a Diana Hamburger, Maria Isabel Escada, Marcio Valeriano e Silvana Amaral.

A Aníbal Fernandes e Carlos Felgueiras pela elaboração de programas de computador; a Marilene Silva, Maria Mazarello e Maria Cristina Varlez pelos serviços de secretaria; a Marcia Silva pela ajuda em assuntos relacionados a pós-graduação; a Júlio César D'Alge pela elucidação de várias dúvidas; e aos funcionários do LTID pela cooperação.

A Marcos Rogério Ramos e operadores do DOP/PI, do INPE/Cachoeira Paulista, pelo processamento das imagens AVHRR/NOAA.

A Braulio Dias e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pelo apoio em experimentos de campo.

Ao INPE, que aceitou e apoiou a realização deste trabalho. Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que financiou o projeto "SEQE" o qual possibilitou a realização de parte do trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

RESUMO

Imagens do sensor AVHRR do satélite NOAA-11 foram utilizadas para detecção, localização e quantificação das queimadas na região dos cerrados, na estação seca de 1989. Os dados foram corrigidos através de imagens de alta resolução espacial do sensor TM do satélite Landsat. No AVHRR a banda 3 foi a que melhor caracterizou as queimadas ativas; no TM a banda 4 define melhor as áreas queimadas através da marca deixada no terreno; em ambos os sensores, as queimadas se caracterizaram por apresentar baixos níveis de cinza. O comportamento temporal mostrou que o maior número de queimadas ocorreu na 2ª quinzena de agosto, chegando a 9 mil pontos de queimada por dia, e verificou-se que o número de queimadas foi subestimado pelo AVHRR em cerca de 26%. Quanto à distribuição espacial, algumas regiões apresentaram maior concentração de queimadas: a) sul do Maranhão; b) leste-central de Tocantins; c) oeste-central da Bahia; d) centro-leste e centro-oeste de Mato Grosso; e) sul-central de Goiás. Os dados do AVHRR mostraram que as unidades campo-cerrado, parque de cerrado e áreas de cerrado com ação antrópica foram mais atingidas pelo uso do fogo, constatando-se que durante a década de 80 ocorreu a transformação de áreas de vegetação natural em áreas de atividades agropecuárias. A regressão linear entre queimadas classificadas no AVHRR/NOAA e TM/Landsat mostrou valor de R^2 de 0,63, sendo obtida uma equação que serviu para estimar a área queimada na região dos cerrados, encontrando-se um valor de 196.000km^2 , correspondente a 9% da área da região.

MONITORING OF BURNING IN THE BRAZILIAN CERRADO REGION USING
AVHRR/NOAA DATA CALIBRATED BY TM/LANDSAT DATA

ABSTRACT

Images from AVHRR/NOAA sensor were used to detect burnings on the Brazilian cerrado region in the dry season of 1989. Data were tested against TM/Landsat high spatial resolution images in a calibration area. Active burnings were best detected with AVHRR band 3, while TM band 4 defined better the burned areas through the scars left by the fires; both sensors characterized the burnings as low grey level areas. Temporal behavior showed that most burnings happened during the second half of August, with frequency reaching 9 thousand points of burning per day. It was found that detection made by AVHRR underestimated by about 26% the number of burnings. Some regions concentrated higher number of burnings: a) south of Maranhão; b) central-east of Tocantins; c) central-west of Bahia; d) central-east and central-west of Mato Grosso; and e) central-south of Goiás. AVHRR data showed that fire is used more intensively on wooded savanna unities, savanna parklands and anthropic activity areas, indicating that natural vegetation areas were transformed into farmlands during the 1980 decade. Linear regression between classified burnings by AVHRR/NOAA and TM/Landsat had a R^2 of 0,63. From the regression equation, an estimate of the total area burned resulted in 196 thousand km^2 , corresponding to 9% of the Brazilian cerrado region.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	ixx
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS	xxiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Objetivos	2
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA</u>	5
2.1 - A vegetação cerrado	5
2.1.1 - Tipos de cerrado	6
2.1.2 - O cerrado (s.l.) dentro da savana tropical ...	8
2.1.3 - Geomorfologia, clima e solos da região dos cerrados	9
2.1.4 - Importância da região dos cerrados	12
2.2 - Queimadas nos cerrados	14
2.2.1 - Fatores e causas das queimadas	14
2.2.2 - Regime de queimadas	16
2.2.3 - Domínio espacial e temporal das queimadas	17
2.2.4 - Efeitos das queimadas	18
2.2.4.1 - Temperatura do ar e do solo	18
2.2.4.2 - Erosão	20
2.2.4.3 - Ciclagem dos nutrientes minerais do solo....	20
2.2.4.4 - Produtividade primária	21
2.2.4.5 - Qualidade das plantas	21
2.2.4.6 - Estrutura e composição das plantas	22
2.2.4.7 - Atmosfera	23
2.3 - Técnicas de sensoriamento remoto na identifica- ção e avaliação de queimadas	23
2.3.1 - Histórico	24
2.3.2 - Processamento de imagens digitais	28
2.3.3 - Comportamento espectral das queimadas	30
2.3.3.1 - Região do infravermelho termal	31
2.3.3.2 - Região do visível e do infravermelho próximo e médio	36
2.3.4 - Domínio espacial	40
2.3.5 - Domínio temporal	41
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS</u>	45
3.1 - Material	45
3.1.1 - Área de estudo	45
3.1.2 - Imagens AVHRR/NOAA	50
3.1.3 - Imagens TM/Landsat	53
3.1.4 - Equipamento e material de apoio	55

3.2 - Metodologia	57
3.2.1 - Processamento das imagens digitais AVHRR/NOAA	59
3.2.1.1 - Análise visual	59
3.2.1.2 - Navegação	59
3.2.1.3 - Classificação e localização das queimadas ..	62
3.2.2 - Avaliação das queimadas na região dos cerrados com dados AVHRR/NOAA	63
3.2.2.1 - Número de pontos de queimada	63
3.2.2.2 - Distribuição temporal: estimativa do número médio de pontos de queimada por dia em cada subperíodo	64
3.2.2.3 - Distribuição espacial dos pontos de queimadas	65
3.2.3 - Comparação de dados de queimadas do AVHRR/NOAA com dados do TM/Landsat da região dos cerrados	66
3.2.3.1 - Seleção de uma área e de um período de controle	66
3.2.3.2 - Comportamento espectral das queimadas	67
3.2.3.2.1 - Imagem AVHRR/NOAA	68
3.2.3.2.2 - Imagem TM/Landsat	69
3.2.3.3 - Comparação entre as áreas queimadas classificadas nas imagens AVHRR/NOAA e TM/Landsat	69
3.2.3.3.1 - Relação espacial entre as áreas queimadas	70
3.2.3.3.2 - Abstenção e confusão da classificação das queimadas no AVHRR	72
3.2.4 - Estimativa da área queimada na região dos cerrados	73
 <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	 75
4.1 - Observações iniciais no processamento das imagens AVHRR/NOAA	75
4.1.1 - Qualidade das imagens	75
4.1.2 - Exatidão da navegação	75
4.2 - Avaliação das queimadas na região dos cerrados através de imagens AVHRR/NOAA	76
4.2.1 - Digitalização das unidades de vegetação dos cerrados	76
4.2.2 - Quantificação das queimadas	77
4.2.3 - Distribuição espacial das queimadas	81
4.3 - Comparação entre queimadas detectadas em imagens AVHRR/NOAA e TM/Landsat	86
4.3.1 - Seleção da área e período de controle	86
4.3.2 - Comportamento espectral das queimadas ativas em imagens AVHRR/NOAA	92
4.3.2.1 - Análise radiométrica na banda 3	92
4.3.2.2 - Comportamento espectral nas bandas 1, 2 e 3	97
4.3.3 - Comportamento espectral das queimadas em imagem TM/Landsat	106
4.3.4 - Comparação entre áreas queimadas classificadas em imagens AVHRR/NOAA e TM/Landsat	113

4.4 - Magnitude da área queimada para a região dos cerrados	123
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE A - IMAGENS AVHRR/NOAA 11 - ESTAÇÃO SECA DE 1989	147
APÊNDICE B - PONTOS DE QUEIMADA DETECTADOS EM IMAGENS AVHRR/NOAA-11 NA ESTAÇÃO SECA DE 1989 ...	151
APÊNDICE C - UNIDADES DE VEGETAÇÃO - REGIÃO DOS CERRADOS	167
APÊNDICE D - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS - ESTAÇÃO SECA DE 1989	171
APÊNDICE E - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS - JUNHO DE 1989	175
APÊNDICE F - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS - JULHO DE 1989	179
APÊNDICE G - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS - AGOSTO DE 1989	183
APÊNDICE H - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS - SETEMBRO DE 1989 ..	187

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Curvas de exitância radiante espectral para o terreno e queimadas, e curva de irradiância solar no topo da atmosfera, comparadas com as bandas dos sensores AVHRR e TM	32
2.2 - Temperatura nas bandas 3 e 4 do AVHRR para dois alvos com alta temperatura em Cleveland, Ohio ..	34
2.3 - Curva da reflectância espectral de vegetação verde na faixa de 0,4 a 2,5 μ m	37
3.1 - Região dos cerrados	46
3.2 - Precipitação mensal em 1989 para a região dos cerrados	47
3.3 - Fluxograma da metodologia	58
4.1 - Número de queimadas por dia para a região dos cerrados na estação seca de 1989	78
4.2 - Distribuição temporal das queimadas para a região dos cerrados na estação seca de 1989	79
4.3 - Precipitação mensal na estação seca de 1989 para a região dos cerrados no estado de Mato Grosso	84
4.4 - Imagem AVHRR/NOAA de 31/08/89 em uma composição colorida (banda 1, vermelho; banda 2, verde; banda 3, azul), correspondente à sub-área	87
4.5 - Imagem TM/Landsat, órbita/ponto 223/69, de 11/09/89, em uma composição colorida (banda 3, azul; banda 4, verde; banda 5, vermelho), correspondente à área de controle ...	88
4.6 - Histograma com a frequência de ocorrência dos níveis de cinza mais baixos em 4 imagens da banda 3 do AVHRR para a estação seca de 1989, na subárea	93
4.7 - Distribuição dos níveis de cinza de algumas queimadas na banda 3 da imagem AVHRR de 08/09/89, na área de controle	94
4.8 - Banda 3 da imagem AVHRR de 31/09/89, na subárea	100
4.9 - Banda 3 da imagem AVHRR de 31/09/89, na subárea, com as queimadas ativas classificadas	100
4.10 - Banda 1 da imagem AVHRR de 31/09/89, na subárea	101
4.11 - Histograma dos níveis de cinza da subárea, para as bandas 1, 2 e 3 da imagem de 08/09/89 do AVHRR/NOAA (q = queimada)	103
4.12 - Variação dos níveis de cinza para queimada, água, solo exposto e vegetação, para as bandas 3, 4 e 5, na imagem TM/Landsat de 11/09/89	108
4.13 - Classificação das áreas queimadas na imagem TM/Landsat, órbita/ponto 223/69, de 11/09/89, em uma composição colorida, na área de controle	109
4.14 - Histograma dos níveis de cinza para as bandas 3, 4 e 5 da imagem TM/Landsat de 11/09/89	112

4.15	- Reta da regressão linear calculada entre áreas queimadas estimadas pelo TM e AVHRR (níveis 0 a 9)	120
4.16	- Resíduos estimados a partir da equação de regressão linear calculada entre áreas queimadas no TM e AVHRR (níveis 0 a 9)	120
4.17	- Reta da regressão linear calculada entre áreas queimadas estimadas pelo TM e AVHRR (níveis 0 a 10)	122
4.18	- Resíduos estimados a partir da equação de regressão linear calculada entre áreas queimadas no TM e AVHRR (níveis 0 a 10)	122

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Principais tipos de cerrados	07
2.2 - Principais solos na região dos cerrados	12
3.1 - Horário (LST) de cruzamento dos satélites NOAA com o equador, após seu lançamento	50
3.2 - Largura e IFOV das bandas do sensor AVHRR	51
3.3 - Cobertura da região dos cerrados pelas imagens AVHRR em função da órbita	53
3.4 - Largura das bandas do sensor TM/Landsat	54
3.5 - Subperíodos definidos para o estudo de queimadas com o número de dias de cada subperíodo	65
4.1 - Área das unidades de vegetação dos cerrados	77
4.2 - Estimativa do número médio de pontos de queimada por dia para a região dos cerrados.....	79
4.3 - Áreas da região dos cerrados com pontos de queimada concentrados na estação seca de 1989 ..	82
4.4 - Comparação do número de "pixels" da faixa de níveis 0 a 9 com a de 0 a 10 em imagens AVHRR na estação seca de 1989	96
4.5 - Parâmetros estatísticos dos níveis de cinza dos "pixels" de queimadas e da subárea nas bandas 1, 2 e 3 de imagens AVHRR/NOAA na estação seca de 1989	102
4.6 - Parâmetros estatísticos dos níveis de cinza da classe queimada e da imagem inteira nas bandas 3, 4 e 5 da imagem TM/Landsat de 11/09/89	110
4.7 - Áreas queimadas classificadas no AVHRR e no TM	114
4.8 - Área queimada corrigida para as unidades de vegetação da região dos cerrados na estação seca de 1989	123
5.1 - Distribuição das queimadas para as unidades de vegetação da região dos cerrados na estação seca de 1989	132

LISTA DE UNIDADES

°C	- grau Celsius
cm	- centímetro = 10^{-2} m
ha	- hectare = 10^4 m ²
K	- Kelvin
KJ/(m/s)	- quilojoule/(metro/segundo)
km	- quilômetro = 10^3 m
km ²	- quilômetro quadrado = 10^6 m ²
m	- metro
mm	- milímetro = 10^{-3} m
mrاد	- miliradiano
rad	- radiano
s	- desvio padrão
μm	- micrômetro = 10^{-6} m

LISTA DE ABREVIATURAS

ATN	- Advanced TIROS-N
AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica
EUA	- Estados Unidos da América
ERTS	- Earth Resources Technology Satellite
FOV	- Field of View
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IBDF	- Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPOV	- Instantaneous Field Of View
Landsat	- Land satellite
l.s.	- lato sensu
LST	- Local Solar Time
MAX.	- Máximo
MIN.	- Mínimo
MG	- Minas Gerais
MSS	- Multispectral Scanner System
NC	- Nível de Cinza
NOAA	- National Oceanographic and Atmospheric Agency
PC	- Personal Computer
Pixel	- Picture element
PMCFB	- Programa de Monitoramento da Cobertura Florestal do Brasil
SIGI	- Sistema Geográfico de Informações
SITIM	- Sistema de Tratamento de Imagens
s.s.	- stricto sensu
TM	- Thematic Mapper
USGS	- United States Geological Survey
UVI	- Unidade Visualizadora de Imagens

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente ocorre nos trópicos uma acelerada conversão de áreas com vegetação natural em terras de agricultura e pastagens, sendo esta uma das maiores questões ecológicas deste final de século quando a preocupação com o meio ambiente assumiu uma escala mundial, com pressões sobre os desmatamentos e queimadas¹, entre outros fenômenos (Wodwell et al., 1987; Malingreau et al., 1989). Em contraste, nos trópicos estão as últimas áreas disponíveis para colonização e produção de alimentos (Malingreau et al., 1989).

O fogo é uma prática comum dos agropecuaristas de áreas tropicais, sendo utilizado principalmente na limpeza de novas áreas agrícolas, com a queima do material vegetal recém derrubado, e no manejo de pastagens. Além disto, as cinzas resultantes aumentam temporariamente a fertilidade do solo. Mas as queimadas destas áreas provocam maior concentração de gases, que causam mudanças na atmosfera e no clima do planeta, além de aumentar a concentração de aerossóis e provocar formação de camadas de fumaça, causando poluição em nível regional. Outros problemas decorrentes do processo de queima são o aumento de "runoff", que amplia a erosão do solo; a degradação do solo, que diminui sua fertilidade; e perda de grupos genéticos da flora e fauna, muitos ainda não identificados e/ou não explorados (Matson e Holben, 1987; Matson et al., 1987; Malingreau et al., 1989, Coutinho, 1990).

¹ O termo queimada neste trabalho será empregado como o do fenômeno que apresenta áreas com fitomassa em combustão e/ou com subprodutos desta combustão.

A partir da década de setenta, fatores econômicos e sociais determinaram a necessidade de uma crescente produção de alimentos no Brasil. A região dos cerrados, com mais de 200.000.000ha, é uma das maiores e últimas reservas de terra do mundo capaz de suportar imediatamente a produção de cereais e a formação de pastagens; assim, apresentou-se com excelente potencial para o incremento da produção agropecuária via abertura de novas áreas de produção (Alencar, 1980; Santos e Aguiar, 1985). Tradicionalmente voltada para a pecuária extensiva, as terras da região passaram a ser utilizadas em culturas mecanizadas, ou em pastagens com espécies mais produtivas que as naturais (Azevedo e Adámoli, 1988). Assim, a região dos cerrados vem sofrendo um intenso desmatamento, acompanhado da prática tradicional da queimada.

1.1 - OBJETIVOS

Em vista das conseqüências que os fenômenos citados anteriormente possam causar em futuro próximo, há necessidade de conhecer e controlar tanto os processos de conversão da vegetação tropical em áreas de exploração agropecuária, quanto as práticas de manejo com potencial de danos ao meio ambiente, como as queimadas. Portanto, do ponto de vista científico e de preservação e manejo dos recursos naturais, é necessário compreender e quantificar estes fenômenos. As avaliações são difíceis pelas extensas áreas envolvidas, e os métodos tradicionais despendem muito tempo e recursos financeiros. Já o sensoriamento remoto orbital é uma técnica rápida, relativamente de baixo custo operacional, com cobertura sinótica, boa margem de exatidão na estimativa de áreas e exclusão da necessidade de deslocamento rotineiro ao local do fenômeno.

Dados do sensor TM a bordo do satélite Landsat têm a vantagem de melhor resolução espacial (30m),

mas a quantidade de dados para a análise é elevada, e os dados disponíveis nem sempre são adequados pela ocorrência de cobertura de nuvens e pela baixa resolução temporal (16 dias), o que dificulta o trabalho de monitoramento. O sensor AVHRR a bordo dos satélites NOAA tem uma cobertura extensa (2700km) e altamente repetitiva (até 6 horas), e possui bandas no visível, infravermelho próximo e termal (como o TM/Landsat), características que são relevantes dadas a extensão e rapidez com que as transformações estão ocorrendo nas áreas de vegetação tropical. Combinado com trabalho de campo e com dados de outros sistemas orbitais como do TM/Landsat (com maior resolução espacial), o AVHRR/NOAA constitui uma base de avaliação das mudanças que estão ocorrendo nestas áreas, o que permite determinar a magnitude de fatores como queimadas, secas e desmatamentos (Townshend e Tucker, 1984; Nelson e Holben, 1986; Wodwell et al., 1987; Nelson et al., 1987; Matson e Holben, 1987; Pereira, 1988; Setzer et al. 1988; Malingreau et al., 1989; Setzer e Pereira, 1991; Robinson, 1991).

Este trabalho visa contribuir para o monitoramento das queimadas, utilizando como área de estudo a região dos cerrados, onde tal fenômeno é uma prática tradicional e antiga, com registros do século passado, mas sobre o qual não existem estatísticas satisfatórias.

Assim, o objetivo deste trabalho foi testar uma metodologia de detecção, localização e quantificação de queimadas na região dos cerrados com o sensor AVHRR dos satélites NOAA, a partir de correção obtida com o sensor TM, de maior resolução espacial, do satélite Landsat.

Esta metodologia permite, em princípio, obter a localização geográfica das queimadas, sua distribuição espacial e temporal, e, por meio indireto, a magnitude da extensão queimada. Sua validação atenderia necessidades

científicas, assim como de preservação e manejo da região dos cerrados.

Como objetivos específicos em relação às queimadas têm-se:

- 1) caracterizar espectralmente nas faixas do visível e infravermelho em imagens AVHRR e TM;
- 2) acompanhar sua evolução espacial e temporal na região dos cerrados, ao longo da estação seca;
- 3) determinação uma relação empírica entre as áreas queimadas derivadas de imagens AVHRR/NOAA e as áreas estimadas através de imagens TM/Landsat, em uma área de controle;
- 4) estimar sua área através de imagens AVHRR/NOAA, corrigida a partir da relação encontrada no item anterior;
- 5) avaliar suas relações espaciais e temporais com a unidade fisionômica da região dos cerrados em que o fenômeno ocorreu.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo faz-se uma descrição da região dos cerrados e suas queimadas, com especial atenção às características importantes para o sensoriamento remoto; também são feitas considerações sobre trabalhos teóricos e práticos já realizados sobre o sensoriamento remoto de queimadas.

2.1 - A VEGETAÇÃO CERRADO

O termo cerrado pode, conforme Sarmiento (1983), designar tanto uma região natural como uma série de formações de plantas com variada proporção de espécies arbóreas e herbáceas. Segundo Azevedo e Adámoli (1988), quando se cita "região dos cerrados" faz-se referência a uma área do território brasileiro superior a 2.000.000km², que apresenta características geomorfológicas, climáticas e fitofisionômicas particulares, onde ocorre uma vegetação de composição florística definida, caracterizada por árvores dispostas segundo maior ou menor grau de dispersão sobre um estrato herbáceo-arbustivo, que durante a estação seca torna-se ressecada.

Tal vegetação, também denominada "cerrado", corresponde à resposta biológica para condições de baixa fertilidade e alta acidez dos solos, a incidência de fogo, e às condições climáticas definidas por totais pluviométricos da ordem de 1500mm, porém concentrados numa estação chuvosa com duração aproximada de 5 a 6 meses, fora da qual se estabelece uma estação seca bem marcada. Este tipo peculiar de vegetação domina o Planalto Central do Brasil, onde predominam as áreas de relevo plano ou suave ondulado, com solos profundos e bem drenados. A vegetação se caracteriza por árvores e arbustos de pequeno e médio

porte, tortuosos, com ramificações irregulares e retorcidas, geralmente com evidências de passagens por fogo. As folhas em geral são rígidas e coriáceas de superfície brilhante, ou revestidas por pelos ou escamas; os troncos possuem uma casca com cortiça grossa, fendida ou sulcada, e as gemas apicais são protegidas por uma densa pilosidade. O estrato herbáceo, dominado pelas gramíneas tem a parte aérea dessecada na época seca, mantendo vivos os brotos regenerativos ao nível do solo, com algumas espécies apresentando órgãos subterrâneos perenes (xilopódios), que permitem rebrotar após queima ou corte (Azevedo e Adámoli, 1988; Ferri, 1977; Ribeiro et al., 1983).

O termo "cerrado", segundo Ferri (1977) e Ribeiro et al. (1983), além de utilizado para designar a formação vegetal do Brasil Central na sua totalidade (l.s. - lato sensu), também é empregado como um tipo fisionômico dessa formação (s.s. - stricto sensu).

2.1.1 - TIPOS DE CERRADO

Os tipos de cerrado podem ser considerados sob dois pontos de vista: o ecológico, e o fisionômico ou estrutural. Do ponto de vista ecológico, a divisão é feita de acordo com a "sazonalidade" do ecossistema; a maior parte do cerrado (l.s.) pertence ao tipo sazonal, no qual um período longo sem chuvas aumenta a probabilidade de queimadas na estação seca, e ambos os fatores, seca e queimada, fornecem uma "ritmicidade" ao funcionamento do ecossistema (Sarmiento, 1983).

O outro critério para a diferenciação dos tipos se baseia nas características estruturais da vegetação. Apresenta-se na Tabela 2.1 um sistema fisionômico baseado na ocorrência de espécies arbóreas, usualmente empregado por autores brasileiros para a

diferenciação dos tipos do cerrado (l.s.), o qual é bastante simples e útil, permitindo também a diferenciação de tipos de paisagens (Ferri, 1977; Eiten, 1983).

TABELA 2.1 - PRINCIPAIS TIPOS DE CERRADOS

TIPO	COBERTURA ARBÓREA (%)
campo limpo	---
campo sujo	<2
campo-cerrado	2-15
cerrado (s.s.)	15-40
cerradão	>40

FONTE: Adaptada de Sarmiento (1983), p. 246.

As formas de vegetação no cerrado (l.s.) se apresentam segundo um gradiente de biomassa, o qual acompanha o gradiente de fertilidade do solo. A forma de menor biomassa é o campo limpo, seguindo-lhe o campo sujo, campo cerrado, cerrado (s.s.) e cerradão. Santos (1988), com medidas em cerrado (s.s.), verificou que a densidade média da fitomassa aérea é de 28t/ha; já Pereira e Batista (1985) verificou para campo-cerrado variação de 3 a 8t/ha.

As formas do cerrado (l.s.) se apresentam com uma vasta gama de características fisionômicas e estruturais, gradativas entre as condições ecológicas mais próximas de um campo ou savana tropical úmida e de uma floresta tropical sazonal úmida, há portanto, em certos casos, a necessidade de uma divisão arbitrária entre as elas para fazer a classificação dos tipos (Ferri, 1977; Eiten, 1983; Ribeiro et al., 1983). Em termos fisionômicos, os quatro primeiros tipos são enquadrados nas formações savânicas, enquanto o cerradão situa-se entre as formações florestais. No entanto, considerando a composição florística desses mesmos tipos, o cerradão deve ser colocado no grande domínio do cerrado, visto que numerosas

famílias, gêneros e espécies são comuns aos demais tipos de cerrados, sendo as diferenças entre o cerradão e os tipos de florestas muito acentuadas neste aspecto (Ferri, 1977).

2.1.2 - O CERRADO (L.S.) DENTRO DA SAVANA TROPICAL

A savana tropical apresenta características estruturais e funcionais próprias que a distinguem de outros ecossistemas tropicais terrestres. Conforme Bourlière e Hadley (1983), a savana tropical exhibe marcante variabilidade, tanto no espaço como no tempo, sendo esta sua mais marcante característica. Devido a esta variabilidade, não há como descrever um ecossistema típico de savana, havendo um gradiente de ecossistemas relacionados, dado que a savana é considerada uma zona de transição entre floresta tropical densa e estepe desértica aberta. Contudo, alguns padrões da savana tropical podem ser identificados, o que possibilita caracterizá-la como se segue: fases úmida e seca alternantes, que fazem com que os padrões de produção sejam marcadamente sazonais, tanto em nível qualitativo como quantitativo; estrutura determinada por competição entre plantas arbóreas e herbáceas em face da umidade disponível no solo; e fogo e nutrientes do solo como fatores modificadores principais. Sendo assim, o emprego da palavra savana é restrito às formações tropicais e subtropicais, onde:

- 1) os principais padrões de crescimento estão associados com a alternância das estações úmida e seca;
- 2) o estrato herbáceo, formado principalmente por gramíneas, é contínuo, ocasionalmente interrompido por árvores e arbustos;
- 3) queimadas frequentes ocorrem durante a época seca.

A definição descrita anteriormente corrobora a citação de Walker (1987), que descreve savana como o ecossistema tropical e subtropical caracterizado por forte sazonalidade (usualmente verão úmido/inverno seco), relacionada com estresse hídrico, no qual a vegetação consiste em cobertura contínua de herbáceas na qual há significativa, mas descontínua, cobertura de arbustos e árvores.

Assim, a savana pode ser considerada um sistema dinâmico, com uma estrutura relativamente simples, e a perturbação de uma das espécies dominantes pode ter uma repercussão de longo alcance em outros componentes do sistema.

De modo geral, o cerrado (l.s.) pode ser considerado uma savana, visto que suas características coincidem com as da savana. Mas, conforme já observado na Seção 2.1.1, em termos fisionômicos o tipo cerradão não pode ser incluído dentro da savana, pois não possui um estrato herbáceo contínuo; portanto, neste sentido restrito o cerrado (l.s.) não pode ser considerado uma savana, apesar da maioria dos seus tipos fisionômicos pertencerem à savana.

2.1.3 - GEOMORFOLOGIA, CLIMA E SOLOS DA REGIÃO DOS CERRADOS

A região dos cerrados refere-se à área do território brasileiro que apresenta características climáticas e fisionômicas particulares, onde a vegetação dominante é o cerrado, mas onde também ocorrem inclusões de florestas e outros tipos de vegetação. Os cerrados dominam o Planalto Central Brasileiro, apresentando quatro grandes expansões dirigidas para nordeste, sudoeste, leste e oeste. Este tipo de vegetação apresenta-se predominantemente em áreas de relevo plano ou suave ondulado, ambientes que são dominados por solos profundos e bem drenados, tais como

latossolos e areias quartzosas. Com relação a altitude, 95% da região situa-se na faixa entre 0 e 900m; quanto à litologia da região, existe o predomínio das coberturas sedimentares (dobradas e não dobradas) como pano de fundo do quadro litológico dos cerrados, sendo reservado um papel secundário para o embasamento cristalino (Azevedo e Adámoli, 1988).

O clima predominante, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo AW caracterizado como tropical chuvoso; apresenta estação seca bem acentuada no período de inverno, e pelo menos um mês de precipitação inferior a 60mm. Uma característica marcante desta região é a presença de dois períodos definidos: a) estação chuvosa, entre outubro e abril, quando cai mais de 90% da precipitação, e b) estação seca, que se prolonga de maio a setembro, com ausência quase total de chuvas, elevada evaporação e baixa umidade relativa. Portanto, durante esta última estação, existem limitações para o uso agrícola desta região. Entretanto, também durante a estação das chuvas, ocorrem de uma a três semanas sem precipitação, o que afeta as culturas em seus diferentes estágios de desenvolvimento; tal fenômeno é conhecido como "veranico" (Espinoza et al., 1982; Azevedo e Adámoli, 1988).

A acentuada estação seca que ocorre de maio a setembro constitui uma das características mais significativas do clima da maior parte da região dos cerrados. Do ponto de vista sinótico em meteorologia, tal situação resulta da presença típica para esta época do ano de um centro de alta pressão - anticiclone - bastante estável sobre o Brasil Central. Este sistema naturalmente induz a circulação troposférica no sentido anti-horário, causando subsidência que desfavorece a formação de nuvens convectivas de chuva.

A distribuição das isoietas mostra precipitações totais anuais inferiores a 800mm na área de influência climática nordestina, e superiores a 1800mm na área de influência climática amazônica. Os valores médios na área "core" (área nuclear) variam entre 1400 e 1700mm, sendo as chuvas, em geral, de curta duração e elevada intensidade, havendo registros no Distrito Federal de uma chuva de 42,7mm em 30 minutos e de 135mm em um dia. A distribuição das isotermas indica que as temperaturas médias anuais oscilam entre 18^o e 25^oC na área "core", com valores até 28^oC ocorrendo na área de influência amazônica. (Espinoza et al., 1982; Azevedo e Adámoli, 1988).

As características tropicais da região dos cerrados, na qual temperatura e precipitação são elevadas, fazem com que os principais tipos de solos (Tabela 2.2) que nela aparecem apresentem grau de intemperismo alto. A quase totalidade dos solos apresentarão algum tipo de problema para o uso agrícola se não houver uma prévia correção e adubação; entre os maiores problemas, podem-se mencionar a baixa saturação de bases, alta saturação de alumínio e acidez elevada; alguns ainda apresentam problemas de drenagem excessiva ou pouca profundidade. Por outro lado, os solos dos cerrados não apresentam só problemas; a principal vantagem reside no fato de que 75% deles ocorrem em relevo plano a suave ondulado, apresentando boas características físicas para a mecanização (Ferri, 1977; Azevedo e Adámoli, 1988). Mas mesmo esta vantagem pode desaparecer face a um manejo inadequado, pois freqüentemente ocorrem chuvas de curta duração e alta intensidade, com grande poder erosivo, capazes então de desagregar o solo (Resck, 1981; Espinoza et al., 1982).

TABELA 2.2 - PRINCIPAIS SOLOS NA REGIÃO DOS CERRADOS

SOLOS	%
latossolo vermelho-amarelo	22,4
latossolo vermelho-escuro	18,7
podzólico vermelho-amarelo	15,2
areias quartzosas	14,5
litólicos	7,0
lateritas hidromórficas	4,2
latossolo roxo	3,5
cambissolos	3,0
concrecionários	2,9
outros	8,6

FONTE: Azevedo e Adámoli (1988), p. 749.

2.1.4 - IMPORTÂNCIA DA REGIÃO DOS CERRADOS

A partir da década de setenta, fatores econômico-sociais determinaram a necessidade de uma crescente produção de alimentos no País. A região dos cerrados, compreendida principalmente nos Estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Bahia e Maranhão, apresentou-se a partir daquela década com excelente potencial para o incremento da produção agropecuária através da abertura de novas áreas (Alencar, 1980; Santos e Aguiar, 1985). Tal fato ocorreu devido à existência de uma infra-estrutura de transporte, e à disponibilidade de tecnologia agrícola capaz de gerar produção e de preservar e melhorar a qualidade do solo através de processos economicamente viáveis (Alencar, 1980).

Tradicionalmente voltada para a pecuária extensiva, a região dos cerrados tem, desde o meados da década de setenta, o seu quadro natural modificado com a introdução da agricultura mecanizada. A pecuária vem deixando de ser extensiva para dar lugar à implantação de pastagens com espécies selecionadas, as quais são

antecipadas pela cultura de arroz de sequeiro (Azevedo e Adámoli, 1988, Coutinho, 1990). A partir de então revelou-se uma das mais promissoras fronteiras agrícolas do País, e atualmente apresenta um elenco de produtos de significativa expressão econômica para o País, fazendo com que a região desponte como importante produtora agropecuária, com mais de um terço do rebanho e da produção nacional de grãos (Santos e Aguiar, 1985; Coutinho, 1990).

Ao mesmo tempo que demonstraram a viabilidade econômica da utilização dos cerrados para a agropecuária, estudos revelaram que a ocupação indiscriminada dessas terras, sem a utilização de tecnologia adequada, envolve altos riscos, com prejuízo para a economia do País e para empresários agrícolas, como já tem acontecido (Alencar, 1980). Conforme comentado anteriormente, na região ocorrem chuvas de curta duração, alta intensidade e grande poder erosivo, com capacidade de desagregar o solo; logo, a não manutenção da cobertura vegetal, assim como o manejo inadequado da matéria orgânica (que, embora ocorra em pequenas proporções, contribui significativamente para a CTC e para a estabilidade dos agregados), implicam a degradação e perda do recurso natural solo, tanto por erosão como por perda de fertilidade. Conforme Crutzen et al. (1985), a prática da queima de material vegetal, além de contribuir para os fenômenos já citados, causa a emissão indesejável de gases e particulados, causando outros problemas, como poluição do ar em nível regional e alterações químicas na atmosfera em nível global.

Portanto, a abertura de novas fronteiras agrícolas na região dos cerrados, assim como a utilização da vegetação da região como combustível, ambas ocorrendo sem controle eficiente, têm levado a problemas com o meio ambiente devido à não utilização de tecnologias adequadas

para a exploração agro-silvo-pastoril da região. Estes problemas, junto com a política pouco eficiente de preservação e manejo dos recursos naturais da região dos cerrados, também causam perdas de espécies vegetais e animais, o que afeta o banco genético da região. Vale lembrar, conforme Bourlière e Hadley (1983), que as savanas - que de modo geral incluem os cerrados - são consideradas um sítio de diversidade ecológica, a qual tem desempenhado uma função chave na evolução da biosfera e de muitas de suas espécies componentes, inclusive do homem, pois a colonização das savanas foi o passo inicial e decisivo na história de nossa espécie.

2.2 - QUEIMADAS NOS CERRADOS

O hábito de atear fogo à vegetação já existia entre as populações indígenas americanas antes mesmo de seu primeiro contato com os descobridores europeus; no cerrado, o dado mais exato quanto à antigüidade das queimadas é o que se refere a material coletado em Brasília-DF, datado de mais de 1600 anos (Coutinho, 1980, 1990). Relatos visuais de queimadas nos cerrados têm registros do século passado; Warming (1908) fez observações de 1863 a 1868 na região de Lagoa Santa-MG, e cita que Lund em 1834 já se referia a elas. Atualmente, o homem é o principal causador de queimadas na vegetação (Coutinho, 1980, 1990; Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987; Pereira, 1988).

2.2.1 - FATORES E CAUSAS DAS QUEIMADAS

São necessários três fatores para a ocorrência de queimada em vegetação (Coutinho, 1980; Soares, 1982):

- 1) material combustível;

- 2) um clima que permita o fornecimento de oxigênio para a queima;
- 3) uma fonte de ignição.

Assim, queimadas acontecem em locais onde o clima úmido permita a produção de uma massa vegetal significativa, e onde uma estação seca transforme esta massa em material combustível, no qual se inicia o fogo; portanto, não é surpresa que certas áreas tropicais sejam mais sujeitas a queimadas (Gillon, 1983). Por exemplo, na região dos cerrados uma significativa massa de gramíneas é produzida durante a estação chuvosa, sendo esta massa transformada em material vegetal combustível durante a estação seca, onde o fogo ocorre facilmente. Segundo Coutinho (1980), é necessário cerca de 1t/ha de fitomassa combustível para que se possa iniciar uma queimada.

O homem moderno ainda mantém muito de práticas primitivas, como a derrubada e queima nas áreas de vegetação natural para a abertura de estradas e para a abertura de novas áreas agrícolas, e queima de restos culturais para limpeza do terreno para plantio. Também as áreas campestres são habitualmente queimadas em intervalos regulares de um a três anos para destruir a palha seca e permitir que o estrato herbáceo produza novos brotos, apreciados pelos animais; outras vezes elas são queimadas para eliminar plantas ou animais invasores. As queimadas também podem ser iniciadas por relâmpagos; dados na África do Sul mostram que de 6 a 17% das ocorrências têm esta origem; este baixo número provavelmente ocorre porque o homem queima muitas das áreas susceptíveis a incêndios por relâmpagos antes que estes ocorram; além disso, chuvas geralmente ocorrem associadas a relâmpagos, o que impede o desenvolvimento das queimadas (Coutinho, 1980).

Na região dos cerrados, Warming (1908) já relatava que a época utilizada para a prática de queimadas era de julho até setembro, com a finalidade de queimar principalmente o estrato herbáceo, já seco devido a estiagem. Com as primeiras chuvas ocorria a rebrota desta vegetação, que se tornava mais palatável e rica para a alimentação das criações. O fogo também era empregado para queimar os restos vegetais após a derrubada dos estratos arbóreo e arbustivo, limpando assim as novas áreas destinadas ao plantio de culturas. Ainda hoje, segundo Coutinho (1990), essas são as duas grandes causas das queimadas nos cerrados.

Apesar da antigüidade e freqüência com que as queimadas têm sido relatadas nos cerrados, poucos dados existem a respeito das suas extensões sobre a região, assim como do número de suas ocorrências.

2.2.2 - REGIME DE QUEIMADAS

Regime de queimada de uma área é definido pelo seu tipo, intensidade, ocorrência sazonal e periodicidade.

As queimadas, na maior parte das savanas tropicais, ocorrem durante a estação seca ou no início da estação úmida, em intervalos de um a cinco anos; em geral elas queimam o estrato herbáceo (formado principalmente por gramíneas), e são superficiais, com chamas de baixa altura.

Na região dos cerrados as queimadas usualmente começam em maio, no início da estação seca; aumentam a incidência em junho e julho, atingindo um máximo de agosto; e com o começo das chuvas, por volta de outubro, a ocorrência diminui bastante. A partir de agosto até meados de setembro tem-se o período de grande ocorrência, pois as condições meteorológicas são favoráveis à

propagação do fogo; nesta época, a umidade relativa do ar pode atingir 20% durante as horas mais quentes do dia (25 a 30°C), que ocorrem geralmente à tarde. Quando usadas no manejo de pastagens, as queimadas são usualmente feitas no final da tarde para reduzir o risco de propagação descontrolada. Tais queimadas antigamente ocorriam em intervalos médios de três anos; mais recentemente, com a transferência de populações rurais de outras regiões do País, e com a transformação da agricultura de subsistência em agricultura de mercado, através da implantação de projetos agrícolas mais ambiciosos, tem sido observada uma diminuição no intervalo entre queimas para dois e até um ano (Coutinho, 1990).

A intensidade das queimadas depende principalmente da quantidade e umidade do material combustível, e visto que nas savanas a fitomassa disponível para combustão varia entre os tipos fisionômicos, espera-se que a intensidade varie entre elas; dados mostram que a intensidade varia de 100kJ/(s/m) em savanas herbáceo-arbustivas até 5000kJ/(s/m) em savanas arbóreas abertas. O intervalo entre queimadas realizados numa área influencia a quantidade de fitomassa combustível disponível, bem como a intensidade. Outro fator que influi na intensidade são as condições meteorológicas reinantes, principalmente temperatura, umidade relativa do ar e velocidade e direção do vento. Frentes de incêndios, queimando na mesma direção do vento, movem-se mais rapidamente que frentes na direção contrária, o que afeta a duração, a temperatura e, conseqüentemente, a intensidade da queimada (Coutinho, 1980, 1990; Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987).

2.2.3 - DOMÍNIO ESPACIAL E TEMPORAL DAS QUEIMADAS

Fatores citados na Seção anterior, que afetam a intensidade de uma queimada, como quantidade e

umidade da fitomassa, e condições meteorológicas, também podem influenciar na duração e na dispersão de queimadas nos cerrados, havendo portanto grande variação de duração, tamanho e forma. Uma queimada também pode ser interrompida por vários motivos, como ao encontrar áreas já queimadas, rios, áreas úmidas, florestas galerias, estradas, ou ainda áreas de cultivo, o que afeta a dispersão e duração. Queimadas controladas, em áreas de culturas ou pastagens artificiais, apresentam formas definidas de blocos retangulares (Wightman, 1973; Deshler, 1974; Gillon, 1983).

Gillon (1983) cita que, nas savanas africanas, as frentes de incêndios variam de 2 a 5km, e queimadas individuais podem cobrir distâncias de 10 a 30km do ponto inicial de ignição ao local do término; portanto, com áreas entre 20 e 150km². Wightman (1973), com medidas também em savanas da África, encontrou áreas queimadas de 20 a 72km².

Medidas de queimadas ocorridas em parques nacionais, em cerrados, mostraram áreas de 800 a 77.600ha; este último dado refere-se a um incêndio no Parque Nacional das Emas (GO) que durou sete dias (Santos e Aoki, 1981; Ponzoni et al., 1986; Shimabukuro et al., 1988).

2.2.4 - EFEITOS DAS QUEIMADAS

Uma queimada sempre produz mudanças físicas, químicas e biológicas no ambiente da vegetação; seus efeitos podem aqui ser classificados em três grupos: efeitos sobre o solo, vegetação, fauna e atmosfera (Soares, 1982).

2.2.4.1 - TEMPERATURA DO AR E DO SOLO

A elevação da temperatura é função em grande parte da massa vegetal combustível que recobre o terreno;

por esta razão, as queimadas florestais desenvolvem temperaturas mais elevadas que as ocorridas em regiões de cerrados. Desde que a fitomassa combustível do cerrado não é uniforme, variando de um tipo fisionômico para outro, pode-se esperar certa variação da temperatura máxima alcançada, dependendo do tipo de cerrado queimado (Coutinho, 1980, 1990; Gillon, 1983). Como há uma relação direta entre temperatura e intensidade, fatores já comentados na Seção 2.2.2, como umidade da massa vegetal, temperatura e umidade do ar, topografia, velocidade e direção do vento, também influem na temperatura da queimada (Coutinho, 1980, 1990; Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987).

Em cerrados, a elevação de temperatura do ar durante o avanço das frentes de incêndios é muito breve, não persistindo mais que quatro a cinco minutos; as temperaturas mais elevadas duram poucos segundos e ocorrem nas partes mais densas do estrato herbáceo, atingindo de 200 a 800°C, sendo possível alcançar até 1000°C (Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987; Coutinho, 1990).

Na superfície do solo, a temperatura pode tornar-se muito alta, mas varia de local para local, havendo medidas de 70 a 800°C; logo após a queimada, em geral, a temperatura da superfície do solo exposto, negro e coberto de cinzas é maior que a de áreas não queimadas. Dentro do solo, sob a frente de incêndio, a elevação da temperatura é muito menor e decresce rapidamente com o aumento da profundidade, não excedendo a 60°C logo abaixo da superfície (Coutinho, 1980, 1990; Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987).

Um importante efeito indireto de uma queimada é a exposição do solo tanto à radiação solar diurna quanto à irradiação noturna, o que acarreta aumento

da amplitude da variação termal diária e da temperatura média diária por cerca de cinco meses, até que haja suficiente cobertura de plantas para interceptar os raios solares (Coutinho, 1980, 1990; Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987). Medidas em savanas da África mostraram que, em uma área queimada, a média mensal da amplitude alcançou 12°C e a média mensal das temperatura máximas 38,5°C, enquanto em uma área não queimada estes valores foram de 9°C e 32,5°C, respectivamente. (Gillon, 1983).

2.2.4.2 - EROSÃO

Após uma queimada, resta muito pouco material vegetal sobre a superfície do solo; e com as chuvas caindo sobre a superfície exposta do solo, ocorrem perdas por erosão; a erosão resulta na diminuição da profundidade do solo e na capacidade de armazenamento de água, assim como na perda da fertilidade desde que os nutrientes do solo estão concentrados principalmente na superfície. Os locais com declividade acentuada e solos friáveis e argilosos são mais susceptíveis a erosão (Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987).

2.2.4.3 - CICLAGEM DOS NUTRIENTES MINERAIS DO SOLO

Experimentos realizados nos cerrados mostram que, através da queimada, a maior parte da biomassa acima da superfície do solo é rapidamente mineralizada em forma de cinzas, o que resulta num aumento temporário nos níveis dos nutrientes minerais na camada superficial do solo, principalmente Ca (aumento de 4kg/ha), K (18kg/ha) e Mg (2kg/ha), que diminuem nos três meses seguintes após a queima. Estes nutrientes podem ser aproveitados pelas raízes mais superficiais, principalmente quando os estratos herbáceo e subarbustivo são dominantes, acelerando assim a ciclagem dos nutrientes minerais; ou na falta daqueles

estratos, lixiviados para camadas mais profundas do solo (Coutinho, 1980, 1990).

Um aspecto importante a ser considerado é a grande exportação de nutrientes que o sistema queimado sofre através da fumaça emanada das chamas. Elementos como N, P e S podem se volatilizar, enquanto outros são exportados na forma de pequenas partículas sólidas, como o Ca, K e Mg; medidas mostram que cerca de 50% da quantidade destes elementos contida na fitomassa são exportados. Alguns resultados mostram que a quantidade de nutrientes minerais perdidos numa queimada pode representar até três vezes a quantidade retornada por ano (via precipitação), o que indica que se queimadas forem feitas em tal área com uma frequência de três anos, talvez um relativo equilíbrio possa ser estabelecido entre a entrada e saída destes nutrientes; isto indica que, a longo prazo, com a reincidência das queimadas a cada um ou dois anos, a tendência será de um empobrecimento do solo cada vez maior (Coutinho, 1980, 1990).

2.2.4.4 - PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA

Considerando que a produção de matéria vegetal é igual a acumulação mais a decomposição, qualquer acumulação de longo prazo na planta, num sistema distrófico, será em detrimento de futura produção, pois muito dos nutrientes são imobilizados; em ecossistemas como os cerrados, a queimada pode ser considerada um componente de grande importância para acelerar a produtividade primária a curto prazo, pois, após a queimada, o nutriente mineral que estava imobilizado na fitomassa seca torna-se novamente disponível para as raízes (Coutinho, 1980, 1990).

2.2.4.5 - QUALIDADE DAS PLANTAS

O aumento no valor nutritivo de plantas após uma queimada tem sido objeto de atenção, visto que este é um dos principais motivos pelo qual o fogo é utilizado no cerrado. Este aumento da qualidade ocorre em sua maior parte à custa dos tecidos jovens que surgem após a queimada, os quais promovem um aumento no valor nutritivo das proteínas, dos carboidratos e do conteúdo mineral, e causam uma diminuição nos constituintes que são de baixo valor nutricional, como celulose e lignina. Entretanto, este aumento é transitório; dura somente até meados da estação chuvosa seguinte (Gillon, 1983; Frost e Robertson, 1987).

2.2.4.6 - ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DAS PLANTAS

A maior parte das plantas se adaptaram ao fogo selecionando características que lhes possibilitassem sobreviver sob as drásticas condições dos cerrados; a adaptação predominante parece ser a que as torna capazes de suportar as altas temperaturas (800 a 1000°C) dos incêndios, apesar da natureza esporádica do fogo como força seletiva. Mas as plantas diferem quanto à tolerância e capacidade de recuperação ao fogo; portanto, queimadas repetidas podem influenciar consideravelmente a estrutura e composição das plantas. Portanto, a extensão sobre o qual ocorrerão as mudanças irá depender do tipo, frequência e intensidade das queimadas, bem como do estado fisiológico e de desenvolvimento dos indivíduos no momento da queimada (Coutinho, 1980, 1990).

Entre as plantas do estrato herbáceo e subarbustivo encontra-se a maioria das espécies altamente resistentes ao fogo, sendo as plantas do estrato arbóreo mais susceptíveis. Com maior frequência de queimadas (intervalo entre queimas de um a dois anos), a tendência é

a redução do estrato arbóreo, menos resistentes ao fogo. O fogo afeta principalmente os indivíduos de menor altura e menor área basal, incluindo as plantas mais novas, o que diminui a regeneração deste estrato. No sentido inverso, na ausência do fogo, o estrato herbáceo-subarbustivo tende a desaparecer, principalmente as gramíneas, que são menos adaptadas à competição nesta situação, havendo uma substituição pelas espécies do estrato arbóreo-arbustivo (Coutinho, 1980, 1990).

2.2.4.7 - ATMOSFERA

Crutzen et al. (1985) citam que o desmatamento e a queima da vegetação que ocorrem durante a estação seca em muitas partes dos trópicos influenciam a composição química da atmosfera em níveis regional e global, e são a maior causa da poluição do ar nestas regiões. Trabalhos mostram que as queimadas podem fornecer substancial quantidade de importantes gases-traço para a atmosfera, tais como CO, O₃, N₂O, NO, CH₄ e outros hidrocarbonetos, COS e CH₃Cl.

Greenberg et al. (1984) e Crutzen et al. (1985) confirmaram que ocorrem elevadas emissões de gases-traço importantes devido a queimadas de biomassa durante a estação seca nos trópicos. Altas concentrações de CO e O₃ foram medidas na região dos cerrados, sendo comparáveis às de média latitude do hemisfério norte onde as emissões industriais desempenham grande função. Queimadas são, portanto, a fonte principal de poluição fotoquímica em grande parte dos trópicos durante a estação seca, e são de uma magnitude de importância para a química do ar global.

2.3 - TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE QUEIMADAS

Em razão da extensa região territorial do Brasil, com locais de difícil acesso, e também em face da escassez de recursos financeiros, é grande a dificuldade em exercer um controle efetivo sobre os recursos naturais do País com a finalidade de executar trabalhos de conservação e manejo. Dentro desse contexto, em relação a outros métodos, o sensoriamento remoto orbital constitui um meio rápido e de baixo custo operacional para o monitoramento de extensas regiões.

Na região dos cerrados, com mais de 2.000.000km², tem ocorrido uma ocupação intensa para o aproveitamento agrícola, sem que se consiga executar rapidamente programas e trabalhos de conservação e manejo da vegetação natural. As queimadas têm sido apontadas como agente modificador do meio ambiente, sendo uma prática freqüente nos cerrados; porém, não existem informações suficientes a respeito desta prática, como da área queimada, e de sua distribuição espacial e temporal.

Assim, a região se inclui entre as áreas onde a aplicação da técnica de sensoriamento remoto orbital possibilita a observação de mudanças no meio ambiente. Através destas técnicas, têm-se realizado estudos para a detecção, localização e quantificação de queimadas, os quais contribuem para as ações de monitoramento de regiões tropicais, como aquela coberta pela região dos cerrados.

2.3.1 - HISTÓRICO

Podem-se dividir os trabalhos desta área entre aqueles onde as queimadas são observadas durante o momento em que estão ocorrendo, quando ainda estão ativas, e aqueles nos quais são observadas as áreas já queimadas,

após a ocorrência do fogo, através da detecção de sua marca no terreno. No primeiro caso, os estudos concentram-se na região do espectro eletromagnético denominada infravermelho termal; e no segundo caso, os estudos ocorrem principalmente na região do visível e do infravermelho próximo e médio.

A detecção de queimadas ativas por meio do sensoriamento remoto iniciou-se em 1962. Este primeiro programa experimental de detecção de queimadas foi desenvolvido por entidades ligadas ao setor florestal dos EUA, e durou cerca de dez anos. O projeto desenvolveu estudos sobre imageadores biespectrais ($3,0-5,0\mu\text{m}$ e $8,0-14,0\mu\text{m}$) atuando no infravermelho termal, instalados a bordo de aeronaves; fizeram-se vários testes para verificar a capacidade do sistema em auxiliar na detecção de incêndios florestais, onde foi necessário estudar as características radiométrico-espectrais das queimadas e dos sensores (Warren, 1980). A detecção e o mapeamento de queimadas através de tais sistemas mostraram-se economicamente competitivos e mais rápidos que sistemas de observação visual com aeronaves ou terrestres (Hirsch et al., 1971).

Dozier (1980, 1981), Matson e Dozier (1981) e Muirhead e Cracknell (1984) mostraram a possibilidade do uso da banda 3 ($3,55-3,93\mu\text{m}$) do sensor AVHRR a bordo dos satélites NOAA (órbita polar) para a detecção de alvos com altas temperaturas, como as queimadas; nos três primeiros trabalhos ressaltou-se a possibilidade do uso conjunto com a banda 4 ($10,3-11,3\mu\text{m}$) para estimar a temperatura e área do alvo. Matson et al. (1984, 1987) demonstraram que, através de imagens da banda 3, existe grande possibilidade de um monitoramento eficiente e econômico das queimadas em regiões extensas e isoladas, para estudos em escala regional e, talvez, global.

Malingreau (1984) demonstrou a utilização da banda 3 do AVHRR para o monitoramento de queimadas em extensas áreas florestais tropicais; Malingreau et al. (1989) indicam a utilização desta banda para a detecção e mapeamento de queimadas sobre diferentes tipos de vegetação, como florestas e savanas. Muirhead e Cracknell (1985) mostraram a utilidade também para o acompanhamento de queimadas em áreas agrícolas na Grã-Bretanha.

Flannigan (1985), com a diferença das bandas 3 e 4, detectou queimadas em áreas florestais do Canadá; Matson e Holben (1987) calcularam a área e temperatura de queimadas na floresta amazônica com o uso das bandas 3 e 4, empregando o método desenvolvido por Dozier (1980, 1981) e Matson e Dozier (1981). Pereira e Setzer (1986) inferiram o número de queimadas na Amazônia através da banda 3.

Pereira (1988) utilizou as bandas 1 ($0,58-0,68\mu\text{m}$), 2 ($0,725-1,10\mu\text{m}$) e 3 ($3,55-3,93\mu\text{m}$) do sensor AVHRR/NOAA numa composição colorida para uma análise preliminar de áreas queimadas na Amazônia Legal brasileira; em seguida, empregou a banda 3 para o estudo espectral e para a classificação automática das queimadas ocorridas durante uma estação de seca.

Setzer et al. (1988) e Setzer e Pereira (1991) utilizaram a banda 3 do AVHRR para a detecção e localização em tempo quase real de grandes queimadas na Amazônia Legal entre julho e outubro de 1987; e Pereira et al. (1990) estimaram a área de uma grande queimada ocorrida em 1988 no Parque Nacional das Emas-GO (região dos cerrados).

Robinson (1991) fez uma revisão das técnicas, e apresenta as possibilidades dos futuros sistemas orbitais na observação de queimadas ativas. Mostra que, na região de $3,0$ a $5,3\mu\text{m}$ do infravermelho termal, as

queimadas radiam intensamente em oposição às superfícies de fundo, o que permite que sejam detectadas por um sensor desta região do espectro eletromagnético, mesmo que ocupem frações do "pixel" da imagem.

Trabalhos ao nível orbital para observação das marcas de áreas queimadas puderam ser iniciados com o lançamento, em 1972, do satélite de recursos naturais Landsat-1 (antigo ERTS-1); Wightman (1973) utilizou imagens seqüenciais da banda 6 (0,7-0,8 μ m) do sensor MSS a bordo do Landsat para acompanhar e avaliar as queimadas durante a estação seca, em savanas da África. Deshler (1974) utilizou tanto a banda 6 como a 7 (0,8-1,1 μ m) para o mapeamento de queimadas em outras regiões de savanas da África, na mesma época, mostrando que as imagens multiespectrais eram em escala adequada para tais estudos.

Lauer e Krumpke (1973) e Seevers e Drew (1973) utilizaram a banda 7 do MSS para estimar com exatidão áreas queimadas nos EUA, mostrando que o método convencional era 10 vezes mais dispendioso. Hitchcock e Hoffer (1974) definiram os limites de uma queimada através de imagem MSS, estimando a área através de imagens digitais das 4 bandas do sensor (faixas espectrais de 0,5 a 0,6 μ m; 0,6 a 0,7 μ m; 0,7 a 0,8 μ m; e 0,8 a 1,1 μ m).

Chen et al. (1979) utilizaram imagens MSS para estimar a área de uma queimada ocorrida em floresta de pinheiro no Estado de São Paulo; a exatidão da estimativa (87%) foi considerada muito alta em face da área relativamente pequena envolvida, de cerca de 100ha.

Santos e Aoki (1981), com imagens do MSS, mostraram que tanto a interpretação visual das bandas 5 e 7, como a automática utilizando-se das bandas 6 e 7 no mínimo, permitiram o mapeamento de queimadas no Parque Nacional de Brasília (região dos cerrados) durante a

estação seca, tendo a característica de repetitividade das imagens possibilitado o acompanhamento da regeneração da vegetação naquelas áreas atingidas pelo fogo.

Ponzoni et al. (1986) utilizaram imagens multitemporais do sensor TM a bordo do Landsat-5 para monitoramento e avaliação da área queimada em 1985 no Parque Nacional de Brasília; tanto na análise visual quanto na classificação automática, mostrou-se que as imagens TM das bandas 4 (0,76-0,90 μ m) e 5 (1,55-1,75 μ m) foram as que proporcionaram melhor separabilidade entre as áreas queimadas e outros alvos. A multitemporalidade das imagens permitiu a observação do início da recomposição da cobertura vegetal na área queimada.

Pereira (1988) empregou uma composição colorida das bandas 3 (0,63-0,69 μ m), 4 e 5 (azul, verde e vermelho, respectivamente) para visualização de áreas queimadas em imagens TM/Landsat do norte do Mato Grosso (Região Amazônica). Em seguida, através da classificação automática, fez-se a caracterização espectral e espacial das queimadas, onde a banda 4 apresentou os melhores resultados pelo maior contraste que as áreas queimadas apresentam com relação a outros alvos nesta banda.

2.3.2 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem digital é uma matriz de pontos denominados "pixels" ("picture elements"); assim, cada linha e coluna da imagem determina um "pixel". O "pixel" se caracteriza pela dimensão linear do IFOV do sensor projetado no terreno e pela distância entre duas amostras consecutivas do IFOV (resolução espacial); também caracteriza o "pixel" o número de bits, que limita o valor do "pixel" a um número inteiro, não negativo e dentro de uma faixa de valores (resolução radiométrica); por exemplo, um "pixel" de 8 bits pode variar seus valores entre 0 e

255. Os valores do "pixel" são chamados níveis de cinza, os quais representam as radiâncias medidas pelo sensor orbital; portanto, a radiância contínua de uma cena é quantizada em níveis de cinza discretos. Além disto, uma imagem pode ter várias bandas com diferentes faixas espectrais (imagem multiespectral) e, em cada banda, o mesmo "pixel" tem um valor em separado de nível de cinza (Schowengerdt, 1983).

As características de uma imagem digital são definidas como os atributos desta imagem. Por exemplo, o nível de cinza do "pixel" é um atributo da imagem. É através da manipulação e análise dos atributos da imagem que se extraem as informações necessárias para o trabalho em andamento. As informações podem ser extraídas de forma qualitativa ou quantitativa (Schowengerdt, 1983).

A forma qualitativa é feita através de uma análise visual da imagem, com a imagem recebendo anteriormente um tratamento para melhorar a visualização dos atributos. A forma quantitativa utiliza a análise automática dos atributos das imagens digitais, sendo a classificação um dos meios mais utilizados; a classificação consiste num processo de decisão para que possa ocorrer a associação de "pixels" a classes. Esta associação é feita nas seguintes hipóteses:

- 1) diferentes objetos implicam propriedades espectrais diferentes, sendo cada objeto caracterizado pelo conjunto de suas respostas em regiões distintas do espectro eletromagnético (também chamado comportamento espectral);
- 2) "pixels" de uma mesma classe têm comportamentos espectrais semelhantes, o que não acontece a classes distintas;

- 3) cada "pixel" está associado a uma única classe (Schowengerdt, 1983).

Os classificadores utilizados podem ser supervisionados ou não-supervisionados. Nos supervisionados o analista tem interação com o classificador, escolhendo amostras que servem para determinar o "comportamento" da classe. Nos não-supervisionados o analista não tem controle sobre a separação das classes, que é feita exclusivamente pelo classificador. Quanto aos critérios de decisão, os classificadores podem ser paramétricos, que assumem uma distribuição estatística particular das classes, como no método de máxima verossimilhança (maxver), ou não paramétricos, que não assumem uma distribuição estatística das classes, como os métodos do fatiamento e paralelepípedo (Schowengerdt, 1983).

O fatiamento é um método de classificação que consiste basicamente em determinar os níveis de cinza mínimo e máximo da imagem, e dividir a faixa entre estes valores em faixas de níveis que serão associados a classes.

Já no método do paralelepípedo, em uma fase inicial de treinamento, são tomadas na imagem amostras de cada classe a ser estudada, o que é feito simultaneamente para todas as bandas utilizadas; esta fase de treinamento caracteriza o método como supervisionado. Em seguida, para cada banda utilizada, são determinados os valores máximo e mínimo dos níveis de cinza das amostras de cada classe; assim, cada classe terá, para cada banda, um nível de cinza máximo e um mínimo. Então, na classificação, todo "pixel" que tenha valor de nível de cinza entre o máximo e o mínimo característico de uma determinada classe, que satisfaça este critério para todas as bandas utilizadas, é associado a esta classe; isto é feito então para todas as classes estudadas.

2.3.3 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS QUEIMADAS

Nesta Seção será abordada o comportamento espectral nas regiões do espectro eletromagnético onde estão a maioria dos sensores e dos trabalhos de queimadas, ou seja, no visível, infravermelho próximo, médio e termal.

2.3.3.1 - REGIÃO DO INFRAVERMELHO TERMAL

Segundo Wilson (1966), o desempenho de um sistema de sensoriamento remoto para detecção de queimadas ativas deve adaptar-se ao caráter espectral das queimadas, da superfície de fundo da queimada e das interações que ocorrem com a radiação no seu trajeto entre a área queimada e o sensor; é necessário ainda que o sistema sensor seja capaz de determinar diferenças de temperatura provocadas pela área queimada.

Existem três fontes de radiação infravermelha termal envolvidas na detecção de queimadas:

- 1) a emissão pelo material vegetal em combustão;
- 2) a emissão e reflexão dos resíduos da combustão;
- 3) a emissão e reflexão de outras fontes quaisquer que interferem nesse processo, como da superfície de fundo da queimada.

A emissão de radiação a partir da combustão de material vegetal segue o comportamento de um corpo negro, com uma curva de radiação característica, conforme mostra a Figura 2.1, tendo a radiação emitida a partir do terreno tem comportamento semelhante em 90% ao de um corpo negro na região de 2 a $7\mu\text{m}$. Duas das janelas desta região, de 3,0 a $4,2\mu\text{m}$ e de 4,5 a $5,3\mu\text{m}$, são particularmente interessantes para a diferenciação entre a emissão do terreno e de materiais incandescentes, por estarem próximas

da região de máxima emissão (determinada pela lei de Wien) para estes materiais. Importante notar que, para a região de 3 a 6 μm , os efeitos da fumaça e neblina sobre a radiação são desprezíveis, mas nuvens densas são opacas (Wilson, 1966; Robinson, 1991).

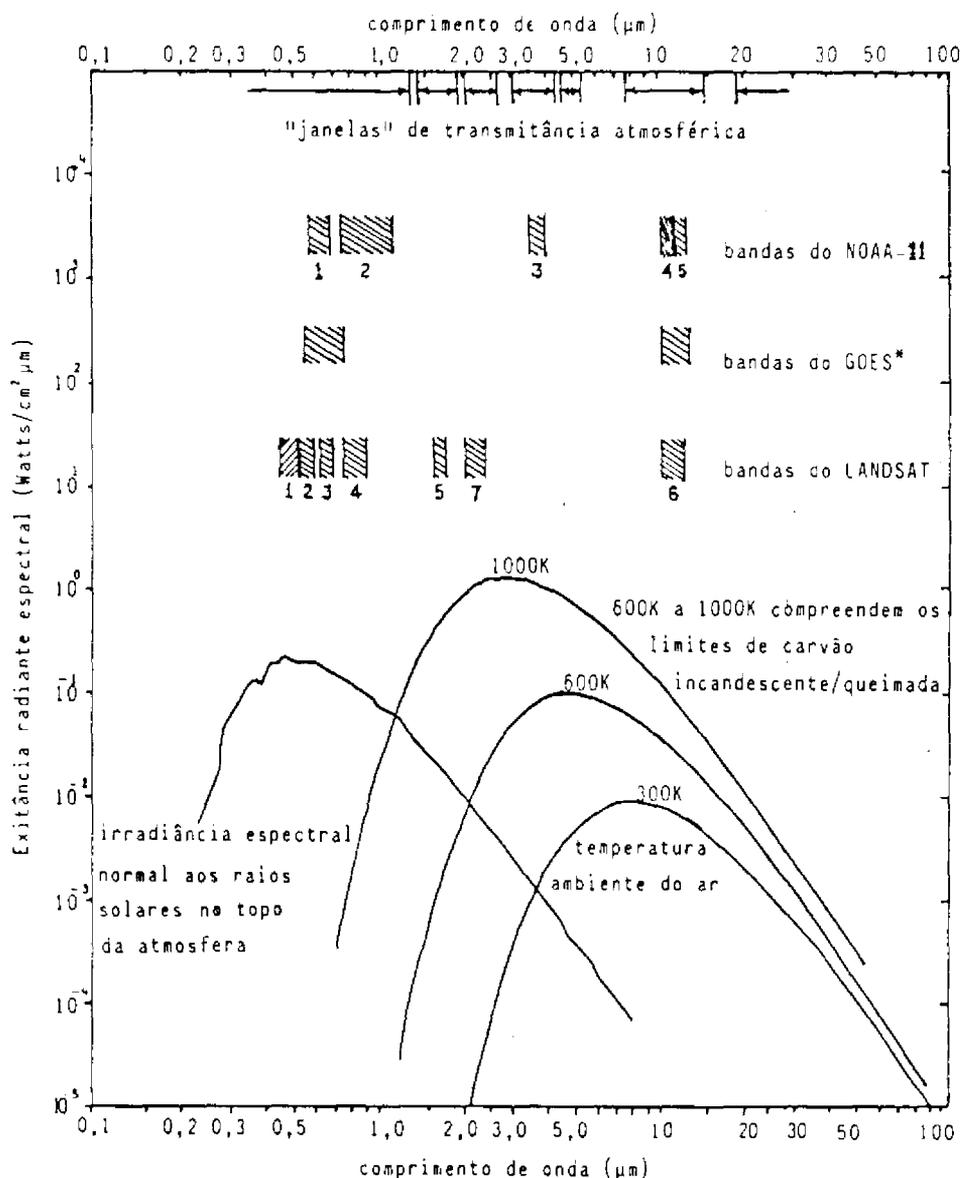


Fig. 2.1 - Curvas de emitância radiante espectral para o terreno e queimadas, e curva de irradiância solar no topo da atmosfera, comparadas com as bandas dos sensores AVHRR e TM.

FONTE: Pereira (1988), p. 50.

O contraste entre o alvo e a área de fundo é tão importante na detecção de um alvo quanto seu fluxo de energia. A superfície de fundo de uma queimada é detectada como uma combinação de radiação emitida da Terra e reflexão da radiação solar; na janela centrada em $10\mu\text{m}$, no infravermelho termal, o fluxo solar é desprezível e a emissão terrestre é significativa, ao contrário do que ocorre nos comprimentos de onda menores que $3,0\mu\text{m}$, onde a radiação solar refletida pela cena é consideravelmente alta, e a emissão terrestre é baixa. Nas duas janelas existentes na região de $3,0$ a $5,3\mu\text{m}$, a emissão terrestre e a reflexão solar são fontes da radiação fracas, com magnitude similar durante o dia; assim, devido à elevada radiação emitida pelas queimadas, ocorre um contraste em relação à superfície de fundo, contraste este mais acentuado nas janelas da região de $3,0$ a $5,3\mu\text{m}$ que na de $10\mu\text{m}$; portanto, as queimadas são mais facilmente detectadas na região de $3,0$ a $5,3\mu\text{m}$. Para um sensor centrado em $3,7\mu\text{m}$, calcula-se que a magnitude da radiação das queimadas é de 1400 a 3200 vezes maior em comparação com a da área de fundo, enquanto para um sensor centrado em $10\mu\text{m}$, é de 25 a 37 vezes maior. Devido à elevada magnitude do sensor centrado próximo a $3,7\mu\text{m}$, uma queimada que ocupa apenas parte do "pixel" de uma imagem pode aumentar substancialmente a temperatura do "pixel" inteiro (Robinson, 1991).

A banda 3 ($3,55$ - $3,93\mu\text{m}$) do AVHRR/NOAA é centrada próxima a $3,7\mu\text{m}$, e diversos trabalhos confirmam que é mais sensível para alvos com altas temperaturas do que a banda 4 ($10,3$ - $11,3\mu\text{m}$), o que possibilita melhor caracterização das queimadas ativas, as quais são possíveis de ser detectadas mesmo que ocupem área inferior à resolução espacial do sensor (Dozier, 1980,1981; Matson e Dozier, 1981; Matson et al., 1984, 1987; Muirhead e Cracknell, 1984, 1985; Malingreau, 1984; Flannigan, 1985;

Matson e Holben, 1987; Pereira, 1988; Malingreau et al., 1989; Robinson, 1991). Um exemplo da diferença entre a banda 3 e a 4 é mostrado na Figura 2.2, o qual confirma o aumento mais elevado de temperatura na banda 3.

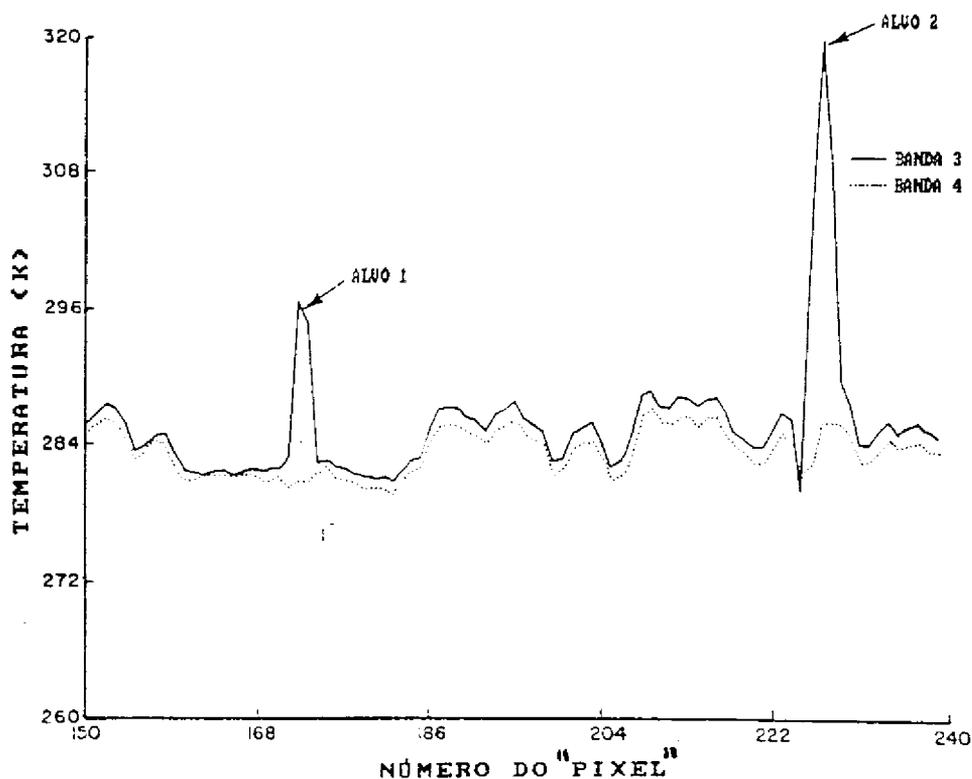


Fig. 2.2 - Temperatura nas bandas 3 e 4 do AVHRR para dois alvos com alta temperatura em Cleveland, Ohio.

FONTE: Matson e Dozier (1981), p. 1313.

Conforme visto na Seção 2.2.4.1, as temperaturas máximas observadas nas queimadas em cerrados alcançam valores de 800 a 1000°C no nível mais denso do estrato herbáceo. Estas temperaturas implicam um pico de energia radiante na faixa do espectro eletromagnético entre 2,7 e 3,7 μ m; portanto, a banda 3 (3,55-3,93 μ m) do AVHRR deve permitir uma boa caracterização das queimadas ativas em cerrados.

Pereira (1988), trabalhando na Amazônia, encontrou como queimadas os níveis de cinza mais baixos das imagens da banda 3 do AVHRR a bordo do NOAA-9. Estes níveis correspondem às maiores temperaturas; numa escala de 256 níveis de cinza, as queimadas corresponderam do nível de saturação até o nível 8 (oito), e neste último ocorreu o maior número de queimadas. Neste estudo as imagens foram processadas com resolução total, sem sofrerem nenhum tipo de correção geométrica ou radiométrica.

Deve-se observar que o nível de saturação é um "corte" em uma determinada quantidade de energia, e conseqüentemente numa temperatura; isto é, qualquer quantidade de energia que corresponda a uma temperatura acima da temperatura de saturação do sensor AVHRR (cerca de 320K) será quantizada na imagem no nível de cinza de saturação, o qual corresponde à temperatura de saturação.

Setzer et al. (1988) e Setzer e Pereira (1991), através deste método, classificaram queimadas na Amazônia, considerando como queimada a faixa do nível de cinza de saturação ao nível 9, com o pico do número de queimadas neste último.

Entretanto, mencionam-se algumas limitações para o uso da banda 3 do AVHRR na detecção de queimadas ativas em alguns trabalhos:

- 1) A ocorrência de nuvens densas que impedem a passagem da radiação, impossibilitando a detecção de queimadas (Muirhead e Cracknell, 1984, 1985; Flannigan, 1985; Pereira, 1988; Robinson, 1991). Por outro lado, a presença de nuvens densas geralmente indicam a ocorrência de chuvas, as quais impedem a prática da queimada; portanto, diminuem em parte o erro devido a esta limitação.

- 2) Outros alvos com altas temperaturas, como poços de petróleo e altos-fornos de siderúrgicas, também apresentam respostas semelhantes às queimadas na banda 3, mas são alvos permanentes na imagem, o que não é o caso das queimadas (Matson e Dozier, 1981; Matson et al., 1984, 1987; Muirhead e Cracknell, 1984, 1985; Robinson, 1991). Além disto, estes alvos, para a região dos cerrados, são em número insignificante em face do elevado número de queimadas na vegetação.
- 3) A possibilidade de determinados alvos reflexivos a radiação solar, como solo exposto ou nuvens, poderem ter um tipo de comportamento nesta banda semelhante às queimadas pela combinação da radiação emitida e refletida (Matson et al., 1984; Muirhead e Cracknell, 1985; Kaufman et al., 1988; Malingreau et al., 1989; Laporte, 1990; Robinson, 1991).
- 4) Esta banda tem uma visão instantânea das queimadas, pois detecta as queimadas ativas, enquanto aquelas ocorridas antes ou depois da passagem do satélite podem não ser detectadas (Pereira, 1988; Robinson, 1991).

2.3.3.2 - REGIÃO DO VISÍVEL E DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO E MÉDIO

A observação de queimadas após sua ocorrência, através da detecção de sua marca no terreno, ocorre na região do visível e do infravermelho próximo; nestes comprimentos de onda as queimadas possuem baixa reflectância, aparecendo nas imagens AVHRR, MSS e TM com valores baixos de níveis de cinza. É no infravermelho próximo, como pode ser observado na Figura 2.3, que ocorre o maior contraste entre as áreas queimadas, de baixa reflectância, com as áreas de vegetação verde, de maior

reflectância nesta região do espectro (Deshler, 1974; Santos e Aoki, 1981; Adámoli et al., 1982; Ponzoni et al., 1986; Pereira, 1988).

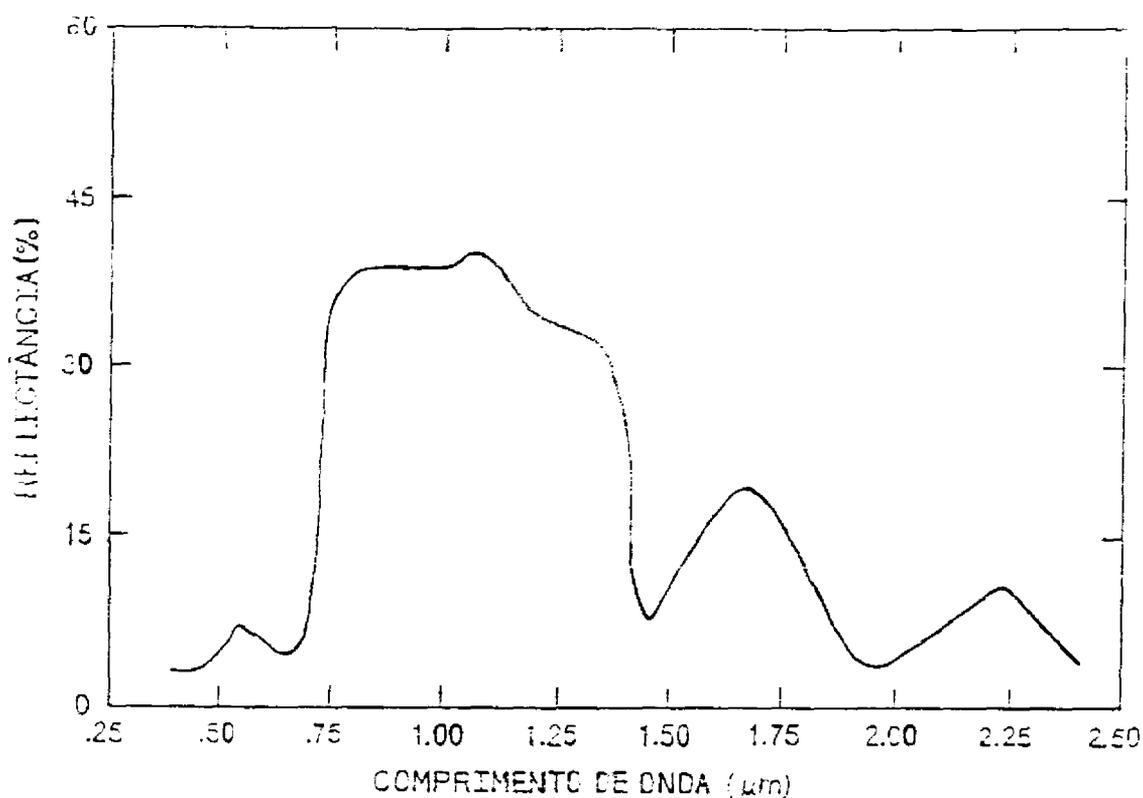


Fig. 2.3 - Curva da reflectância espectral de vegetação verde na faixa de 0,4 a 2,5 μm .

FONTE: Tucker e Sellers (1986), p. 1369.

Segundo Deshler (1974), as marcas das queimadas aparecem negras e claramente visíveis nas bandas 6 (0,7-0,8 μm) e 7 (0,8-1,1 μm) do MSS/Landsat; mas com a ocorrência acentuada de queimadas que liberam consideráveis quantidades de fumaça, a radiação recebida pelo satélite pode ser atenuada, o que dificulta a distinção de alvos. Santos e Aoki (1981) citam que as bandas 5 (0,5-0,7 μm) e 7 do MSS possibilitam uma fácil identificação das queimadas, tanto pela análise visual como na classificação automática; e a banda 7 apresenta melhores resultados. Conforme Adámoli et al. (1982), as queimadas foram facilmente identificáveis

na banda 7 do MSS e, tanto em imagens como em medidas de reflectância no campo, a região do infravermelho próximo foi a mais sensível para registrar a ocorrência de queimadas.

Ponzoni et al. (1986), trabalhando no Parque Nacional de Brasília (região dos cerrados), mostraram que na análise visual as melhores bandas do TM/Landsat para o estudo de áreas queimadas são a 4 ($0,76-0,90\mu\text{m}$) e 5 ($1,59-1,75\mu\text{m}$), pela maior separabilidade que proporciona entre as classes. A análise visual da combinação colorida das bandas 3 ($0,63-0,69\mu\text{m}$), 4 e 5 (azul, verde e vermelho, respectivamente) permitiu a observação de locais contendo fogo e o estudo da regeneração da vegetação, neste caso com imagens multitemporais onde a tonalidade mais preta apresentada pela área queimada passou a esverdeada, indicando a presença de rebrota. Na classificação automática das imagens digitais TM de 14/06/85 e 30/06/85 (bandas 3, 4, 5 e 7, esta com faixa de $2,08-2,35\mu\text{m}$), com os métodos maxver e paralelepípedo, não aconteceram confusões entre queimada e outras classes; na banda 3 a média dos níveis de cinza das queimadas foi de aproximadamente 39; na banda 4 de 28; e na banda 5 de 52. As bandas 4 e 5 também apresentaram os melhores resultados na classificação automática.

Pereira (1988), com estudo na floresta amazônica, utilizou o método do paralelepípedo para a classificação das áreas queimadas com as bandas 3, 4 e 5 da imagem TM de 11/05/85. As bandas foram visualizadas numa composição colorida com o azul, verde e vermelho, respectivamente, onde as queimadas aparecem com tonalidade magenta, pois quase não refletem na banda 4, e a vegetação aparece verde. Foram encontrados valores médios de nível de cinza de 42,0 (desvio padrão de 6,3) para a banda 3; de 34,5 ($s = 4,9$) para banda 4; e de 62,3 ($s = 13,3$) para a

banda 5. Em comparação com outros alvos, na banda 3 a média dos níveis de cinza mais baixas foi da floresta (26,3), seguida por pastagens (35,3), queimada (42,0) e solo exposto (48,2); para a banda 4 a média mais baixa foi da queimada (34,5), seguida pelo solo exposto (55,8), pastagem (61,5) e floresta (71,6); e para a banda 5 a média menor foi da floresta (50,7), depois a queimada (62,3), a pastagem (75,9) e solo exposto (114,3).

Pereira (1988) indica a banda 4 do TM como a melhor banda para identificação e quantificação de áreas queimadas pelo contraste que apresentam nesta banda; isto ocorre porque nesta faixa do espectro as áreas queimadas se apresentam com níveis de cinza bem mais baixos do que o de outros alvos, havendo um considerável decréscimo nos valores de níveis de cinza, conforme a recentidade das queimadas. Utilizando a banda 4 juntamente com as bandas 3 e 5, foi possível uma boa classificação automática com os dados digitais, havendo uma confusão mínima com água.

Pereira (1988), na análise visual das imagens AVHRR a bordo do NOAA-9, utilizou uma composição colorida obtida com as bandas 1 (0,58-0,68 μ m), 2 (0,725-1,10 μ m) e 3 (3,55-3,93 μ m) nas cores vermelho, verde e azul, respectivamente, onde as queimadas aparecem com cores escuras, a vegetação com tonalidade entre o verde e o cian, a fumaça com tons avermelhados até amarelados, geralmente com formato alongado, e as nuvens com tonalidade branca a amarela. As queimadas foram classificadas na banda 3 através do método do fatiamento, sendo a classe queimada utilizada posteriormente para extrair as características espectrais nas 3 bandas. Assim, encontrou os seguintes valores médios de níveis de cinza (com os intervalos de confiança ao nível de 1% de probabilidade): 34 ± 34 para banda 1; 40 ± 28 para a banda 2; e 6 ± 7 para a banda 3. A

banda 3 foi a que melhor classificou as queimadas, não havendo confusão com outras classes.

Através da Figura 2.1, observa-se que o sistema sensor AVHRR/NOAA possui alguma vantagem sobre o TM/Landsat para o estudo de queimadas ativas, por possuir uma banda na região de 3,5 a 4,0 μm . O fato de haver bandas nas regiões espectrais do visível e infravermelho próximo permite a observação de diferentes superfícies (Pereira, 1988).

2.3.4 - DOMÍNIO ESPACIAL

A utilização do sensoriamento remoto orbital para medidas espaciais de queimadas foi demonstrada em diversos trabalhos, inclusive para a vegetação de cerrado, e em outros tipos de vegetação do Brasil.

Wightman (1973), com medidas em imagens MSS em savanas da África, encontrou áreas queimadas de 20 a 72km²; Santos e Aoki (1981), com imagens MSS do Parque Nacional de Brasília (área de 280km²) encontraram áreas queimadas de 157km² no ano de 1975 e de 8km² em 1977; Ponzoni et al. (1986), no mesmo parque, encontraram área de 107km² em 1985 através de imagem TM.

Matson e Holben (1987) usaram um algoritmo que emprega as bandas 3 (3,55-3,93 μm) e 4 (10,30-11,30 μm) do AVHRR para calcular a área de queimadas na floresta amazônica, que variaram de 0,004 a 0,09km².

Shimabukuro et al. (1988) mediram a queimada em 1988 no Parque Nacional das Emas (GO) através de imagens TM, encontrando uma área de 776km². Pereira et al. (1990) estimaram através da banda 3 do AVHRR a área desta mesma queimada, encontrando uma área que foi apenas 13,3% do valor estimado com o TM; portanto, neste caso, o AVHRR

subestimou o valor da área queimada. Neste trabalho foram feitas considerações a respeito da exatidão do programa de navegação desenvolvido por Figueiredo (1990), que encontrou um possível erro máximo de três "pixels" no sentido latitudinal, e de um "pixel" no sentido longitudinal.

Pereira (1988), com medidas em queimadas na Amazônia Legal, verificou que o AVHRR superestimou em 27% a área queimada, e que as queimadas tinham área até 3,0km² em 56% dos casos, e 5,0km² em 78% dos casos. O estudo da distribuição espacial confirmou que as queimadas são causadas principalmente pelo homem.

Pereira (1988) afirma que, do ponto de vista da observação de queimadas em áreas extensas, o melhor sistema sensor é o AVHRR/NOAA, por permitir uma cobertura de áreas com extensões continentais devido a sua faixa de corte de 2700km, sendo a do TM de 185km. Para avaliações de área com maior exatidão, o TM é mais adequado que o AVHRR por possuir alta resolução espacial (30m), quando comparado com a do AVHRR (1,1km no nadir).

2.3.5 - DOMÍNIO TEMPORAL

A utilização de imagens multitemporais de sistemas sensores orbitais permite a realização de vários estudos, como os de repetitividade e ocorrência de queimada ao longo do ano, e os de extinção de queimada e de regeneração da vegetação (Wightman, 1973; Deshler, 1974; Santos e Aoki, 1981; Ponzoni et al., 1986; Pereira, 1988; Setzer et al., 1988; Pereira et al., 1990, Setzer e Pereira, 1991).

Setzer et al. (1988) verificaram que período de queimadas para a Amazônia Legal ocorre principalmente de agosto até meados de setembro. Conforme Pereira (1988), também para a Amazônia, a duração das queimadas em geral é

de até três dias; as queimadas com até 0,2km² duram no máximo até um dia, e as com até 1,4km² duram até dois dias, mas podem durar mais de uma semana em áreas maiores.

No Parque Nacional das Emas, em 1988, o incêndio queimou 77,6 mil (Shimabukuro et al., 1988) e durou sete dias, tendo sido acompanhado em imagens AVHRR sucessivas, conforme descrito por Pereira et al. (1990).

Conforme Wightman (1973) e Deshler (1974), nas savanas a duração da marca (cinzas escuras) da queimada pode ser de até dois meses, dependendo sua duração da ocorrência de ventos e chuvas. Ponzoni et al. (1986) utilizaram imagens de antes, durante e depois da ocorrência de uma queimada no Parque Nacional de Brasília, o que possibilitou o acompanhamento da evolução da queimada e da regeneração da vegetação; sendo que após dois meses, a marca da queimada já havia praticamente desaparecido.

As imagens do sistema Landsat têm resolução temporal de 16 dias, sendo pouco adequadas tanto para a detecção de queimadas ativas, quanto para estudos sobre o comportamento da queimadas; dependendo da ocorrência de nuvens sobre a região de estudo, podem se tornar inadequadas também para a observação posterior das marcas das queimadas (Robinove, 1975).

Os sensores AVHRR a bordo dos dois satélites NOAA imageam um determinado alvo até 4 vezes ao dia, proporcionando imagens com resolução temporal de até 6 horas; dessa forma esse sistema é superior ao sistema TM/Landsat, pois possibilita a observação de queimadas em tempo quase real, quanto a realização de estudos que exijam uma frequência alta de dados, como o de comportamento de queimadas. Além disto, conforme já comentado anteriormente (Seção 2.2.2), o horário mais favorável à realização de queimadas na região dos cerrados é a tarde, por ser o mais

quente (25-30°C) e seco (pode atingir 20% de umidade relativa). Além disso, o satélite NOAA têm uma passagem às 13:40h (LST), portanto é adequado para observação das queimadas ativas; enquanto isto, o TM/Landsat passa às 9:45h (LST), horário que não impede avaliações posteriores à queimada, mas dificulta ainda mais a observação de queimadas ativas (Pereira, 1988; Robinson, 1991). Cabe observar que, no uso da banda 3 do AVHRR, tem-se uma visão instantânea da cena, podendo não detectar as queimadas ocorridas em horários diferentes da passagem do satélite, principalmente nos cerrados, onde a elevação da temperatura é muito breve, conforme comentado na Seção 2.2.4.1; mas, conforme observado, a temperatura de um solo onde ocorreu uma queimada é maior do que a de uma área não queimada, até que se estabeleça uma cobertura de plantas, podendo ocorrer a detecção se a passagem do satélite for após a queimada.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - MATERIAL

A fim de cumprir os objetivos do trabalho, foram selecionados o mapa da região dos cerrados (área de estudo) e os dados dos satélites AVHRR/NOAA e TM/Landsat, que, dentro da metodologia utilizada, foram utilizados de modo complementar para a avaliação das queimadas.

3.1.1 - ÁREA DE ESTUDO

A região dos cerrados refere-se a uma área do território brasileiro com mais de 2.000.000km², abrangendo o Planalto Central e cobrindo a maior parte dos Estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Bahia, Maranhão e Piauí, e partes menores dos Estados de São Paulo, Pará e Rondônia. Seus limites estão compreendidos entre os paralelos 2°S e 25°S de latitude e os meridianos 41°W e 62°W de longitude (Figura 3.1).

A região tem como vegetação dominante o cerrado (s.l.), mas ocorrem inclusões de florestas e outros tipos de vegetação. Os valores médios de precipitação total anual variam entre 1400 e 1700mm, e a temperatura média anual oscila entre 18° e 25°C. A região tem como uma de suas características principais a presença de dois períodos climáticos bem definidos: a) estação das chuvas, de outubro a abril, quando ocorre mais de 90% da precipitação; e b) estação da seca, que se prolonga de maio a setembro, com ausência quase total das chuvas e baixa umidade relativa.

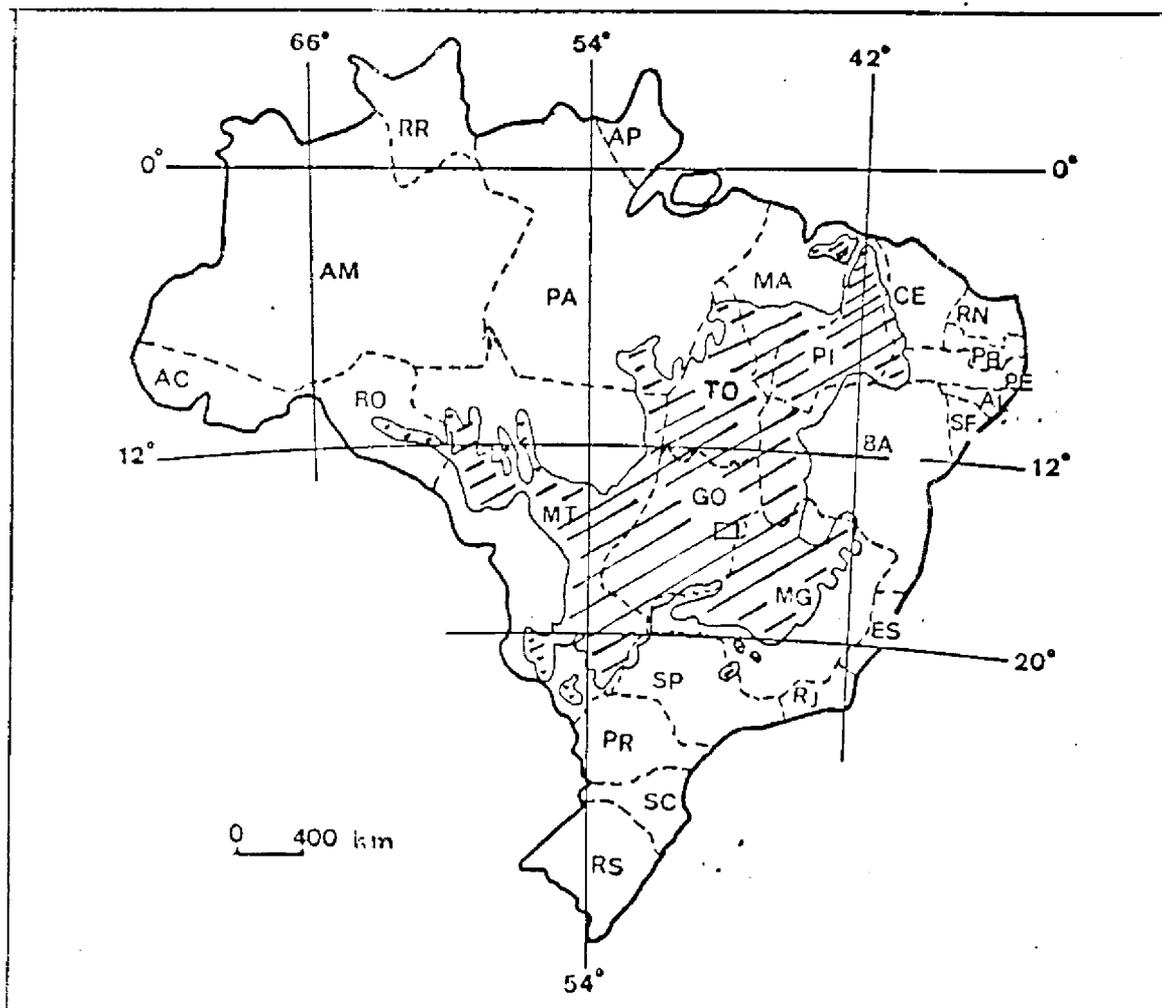


Fig. 3.1 - Região dos cerrados.

FONTE: EMBRAPA (1978).

A Figura 3.2 apresenta os dados mensais de precipitação de quatro estações para 1989, que foi o ano trabalhado (Boletim Agroclimatológico, 1989); os dados mostram que houve queda de precipitação entre os meses de maio e setembro, sendo esta uma das características da ocorrência de uma estação seca neste período, a qual propicia a ocorrência de queimadas. Dados de outra publicação (Climanálise, 1989) mostram que, na região dos cerrados, de maio a julho, a precipitação esteve dentro das características de uma estação seca (menor que 50mm),

apesar de ter estado acima da normal climatológica em junho e julho. Em agosto ficou caracterizada a continuação da estação seca, apesar das precipitações acima da normal, sendo importante ressaltar que nos Estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul ocorreram precipitações elevadas, com desvios acima da normal de 50 a 250mm. Em setembro continuou a estação seca, sendo a precipitação abaixo da normal; e em outubro ocorreu o início da estação chuvosa, com a ocorrência de precipitações mais elevadas que as características de uma estação seca. Assim, em 1989 ocorreu uma estação seca de maio a setembro, mas com precipitações de junho a agosto acima da normal, causando uma estação seca com precipitações mais elevadas que uma estação seca típica.

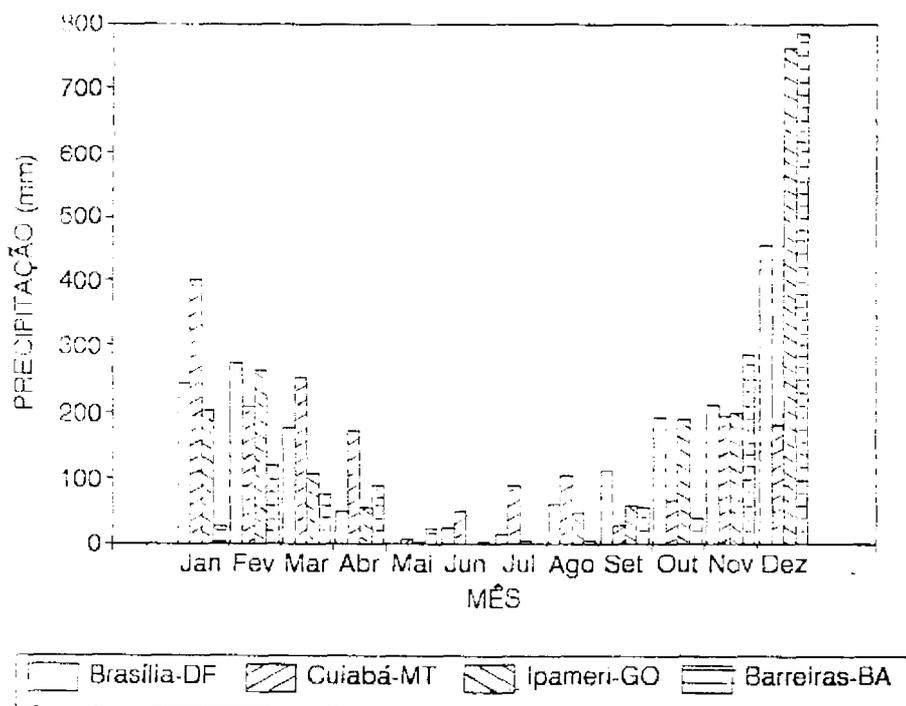


Fig. 3.2 - Precipitação mensal em 1989 para a região dos cerrados.

Os solos são geralmente profundos e bem drenados, como os latossolos e as areias quartzosas; são

solos de baixa fertilidade, que necessitam de correção e adubação para o uso agrícola; por outro lado, apresentam boas características físicas, com relevo plano a suave ondulado, o que facilita o emprego de práticas agrícolas mecanizadas (Azevedo e Adámoli, 1988).

Tradicionalmente voltada para a pecuária extensiva, a região dos cerrados tem, desde meados da década de setenta, o seu quadro natural modificado com a introdução da agricultura mecanizada. A pecuária vem deixando de ser extensiva para dar lugar à implantação de pastagens com espécies selecionadas, as quais são antecipadas pela cultura de arroz de sequeiro (Azevedo e Adámoli, 1988, Coutinho, 1990). A ocupação mais intensa da região dos cerrados tem levado a problemas com o meio ambiente devido à não utilização de tecnologias adequadas para a exploração agro-silvo-pastoril da região; uma prática agrícola comum à região é a queima de vegetação durante a estação seca, para o manejo de pastagens e para a limpeza de novas áreas de plantio (Coutinho, 1980, 1990).

A base cartográfica para a delimitação da região dos cerrados foi o Mapa de Vegetação do Brasil produzido pelo IBGE e IBDF (hoje IBAMA) em 1988. Este mapa foi elaborado a partir de informações geradas pelo Projeto RADAMBRASIL no período de 1973 a 1983 (informações obtidas com base em imagens de Radar), e das cartas produzidas pelo Programa de Monitoramento da Cobertura Florestal do Brasil (PMCFB). O mapa apresenta uma reconstituição dos tipos de vegetação que provavelmente revestiam o território brasileiro na época do seu descobrimento.

Foi definida como região dos cerrados a superfície contínua delimitada no mapa como a região fitoecológica da savana, junto com as áreas de tensão ecológica da savana (áreas de contato entre savana e outras

formações); deve ser observado que, no interior desta área contínua, estão incluídas áreas de floresta estacional de tamanho não significativo para o estudo. Como unidades de vegetação dentro da região dos cerrados foram delimitadas as formações remanescentes da savana e as áreas com ação antrópica (áreas com vegetação secundária ou com atividade agropecuária).

Portanto, com base no Mapa de Vegetação, foi definida a seguinte divisão em unidades de vegetação:

- savana arbórea densa;
- savana arbórea aberta;
- savana parque;
- savana gramíneo-lenhosa;
- áreas de savana com ação antrópica;
- áreas de tensão ecológica, onde foram incluídas as áreas de tensão da savana e as áreas de floresta estacional não significativas;
- áreas de tensão ecológica com ação antrópica.

Deve ser observado que as formações remanescentes delimitadas no Mapa de Vegetação são zonas de dominância dos tipos do cerrado (s.l.) pois, conforme já observado na Seção 2.1.1, uma das mais marcantes características do cerrado é sua variabilidade, com freqüentemente variação entre tipologias, muitas vezes em distâncias de poucos quilômetros; portanto, em certos casos, existe a necessidade de uma divisão arbitrária entre os tipos.

Em vista das considerações feitas na Seção 2.1.2, que de modo restrito não considera savana como sinônimo de cerrado, e conforme Silva e Assis (1982), que discorrem sobre a classificação da vegetação adotada pelo RADAMBRASIL, foi considerado que as unidades de vegetação identificadas acima correspondem respectivamente a:

- cerradão;
- campo-cerrado;
- parque de cerrado;
- campo;
- áreas de cerrado com ação antrópica;
- áreas de tensão ecológica;
- áreas de tensão ecológica com ação antrópica.

O termo parque de cerrado é muito pouco utilizado na literatura; Ribeiro et al. (1983) o empregam como uma vegetação do cerrado (s.l.) intermediária entre o campo-cerrado e campo sujo descritos na Seção 2.1.1.

3.1.2 - IMAGENS AVHRR/NOAA

Os satélites da série NOAA do tipo "Advanced TIROS-N" (ATN) estão colocados em órbita circular com altitude nominal de 833km, $98,89^{\circ}$ de inclinação (quase polar), período de 102 minutos, e heliossíncrona. Com estas características, ocorrem 14,1 órbitas por dia; portanto, o traço suborbital não se repete em base diária (Kidwell, 1991). A hora solar local (LST) da passagem do satélite, logo após o lançamento, é mostrado na Tabela 3.1; mas o NOAA-11, conforme mostrado por Price (1991), com o decorrer de sua permanência no espaço tem seu horário de passagem atrasado em cerca de 20 minutos no período de um ano, passando cada vez mais tarde.

TABELA 3.1 - HORÁRIO (LST) DE CRUZAMENTO DOS SATÉLITES
NOAA COM O EQUADOR, APÓS O SEU LANÇAMENTO

SATÉLITE	NÓ ASCENDENTE	NÓ DESCENDENTE
NOAA-11	13:40	01:30
NOAA-12	19:30	07:30

FONTE: Adaptada de Needham (1988), p. 1333.

Os satélites NOAA-11 e 12 são atualmente os satélites operacionais da série NOAA. Estes satélites atuam com órbitas em quadratura, o que permite a cobertura de uma mesma região a cada 6 horas. Conforme trabalhos de detecção de queimadas já realizados por Pereira (1988), Setzer et al. (1988), Malingreau et al. (1989) e Setzer e Pereira (1991), foi utilizada a passagem vespertina do NOAA-11 (13:40h); à tarde, conforme Coutinho (1990), as queimadas ocorrem em maior número na região dos cerrados. Portanto, foi utilizada uma imagem diária.

A bordo dos satélites NOAA existe o sensor "Advanced Very High Resolution Radiometer" (AVHRR); as imagens geradas pelo sensor têm em cada linha 2048 "pixels", com uma distância de 0,95mrad entre si, o que resulta em um campo de visada (FOV) de $\pm 55,4^\circ$, que fornece uma faixa de corte no terreno de 2700km (Kidwell, 1991). O AVHRR possui quatro ou cinco bandas espectrais, dependendo do satélite. Na Tabela 3.2 são apresentadas as faixas destas bandas e os valores do campo de visada instantâneo (IFOV).

TABELA 3.2 - LARGURA E IFOV DAS BANDAS DO SENSOR AVHRR

BANDA	LARGURA (μm)		IFOV (mrad)
	NOAA-11	NOAA-12	
1	0,58- 0,68	0,58- 0,68	1,39
2	0,725- 1,10	0,725- 1,10	1,41
3	3,55- 3,93	3,55- 3,93	1,51
4	10,30-11,30	10,50-11,50	1,41
5	11,50-12,50	10,50-11,50	1,30

FONTE: Kidwell (1991), p. 3-1.

Como o IFOV médio é cerca de 1,4mrad, a uma altitude nominal de 833km tem-se um elemento de resolução no terreno de 1,1km ao nadir; fora do nadir, no ângulo máximo de visada ($55,4^\circ$), o elemento de resolução no

terreno é de 2,4km ao longo do sentido da órbita do satélite, e de 6,9km ao longo do sentido da varredura do sensor (Kidwell, 1991).

Neste trabalho de monitoramento de queimadas ativas na região dos cerrados foram utilizadas as bandas 1, 2 e 3 do AVHRR, com base em trabalho de detecção de queimadas na Amazônia de autoria de Pereira (1988). A banda 1 detecta radiação refletida na faixa do visível, definindo feições do solo, da cobertura vegetal, das nuvens e de plumas de fumaça. A banda 2 detecta radiação refletida na faixa do infravermelho próximo; define feições de corpos d'água; possibilita a avaliação da vegetação, a observação de nuvens e de plumas densas de fumaça. A banda 3 detecta radiação emitida na faixa do infravermelho termal; permite a extração de limites terra/água, a análise da temperatura de superfícies e o mapeamento noturno de nuvens; é também sensível às fontes de calor extremo, o que permite a detecção de incêndios (NOAA, 1985; Pereira, 1988).

As imagens AVHRR/NOAA são recebidas pela estação de recepção do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Cachoeira Paulista-SP, sendo gravada diariamente a passagem das 13:40 (LST) no período de junho a outubro, para estudos de queimadas e vegetação; a gravação é feita em fitas magnéticas com quantização de 10 bits (1024 níveis de cinza). A longitude de cruzamento com o Equador das órbitas gravadas abrange de 44^oW a 70^oW.

Com o programa GERAREP (Fernandes, 1990b), foi calculada a cobertura da região dos cerrados pelas imagens AVHRR em função das órbitas gravadas, resultando na Tabela 3.3. Com a órbita mais a leste possível (44^oW), a imagem do AVHRR cobre 60% da região dos cerrados, do lado oriental; foi encontrada então a órbita a oeste de forma que a cobertura do lado ocidental dos cerrados fosse também

de aproximadamente 60%, ou seja, 63°W. Portanto, para manter a normalidade dos dados, as órbitas selecionadas para o trabalho variaram de 44°W a 63°W de longitude de cruzamento com o Equador, sendo que entre estas longitudes, as imagens do AVHRR cobrem toda a faixa de latitude compreendida pela região dos cerrados.

TABELA 3.3 - COBERTURA DA REGIÃO DOS CERRADOS PELAS IMAGENS AVHRR EM FUNÇÃO DA ÓRBITA

ÓRBITA* (graus)	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	63	64	66	68	70
COBERTURA(%)	60	70	79	88	98	100	96	90	80	69	62	56	47	37	27

* longitude oeste de cruzamento com o Equador.

As imagens foram selecionadas entre 10 de junho e 12 de setembro de 1989, portanto, dentro da estação seca; há um total de 63 imagens no período citado, cuja listagem completa pode ser observada no Apêndice A.

3.1.3 - IMAGENS TM/LANDSAT

O Landsat-5, lançado em 1984, possui uma órbita circular com altitude de 750km, inclinação de 98,2°, período de 98,7 minutos, heliossíncrona, proporcionando uma cobertura repetitiva a cada 16 dias; a hora nominal de cruzamento com o Equador é de 9:45±15'. O Landsat possui um sensor de varredura denominado "Thematic Mapper" (TM) com 7 bandas espectrais, conforme descrito na Tabela 3.4. Este sensor tem um IFOV que gera no terreno um elemento de resolução de 30m (exceto para a banda 6, que é de 120m) e faixa imageada no terreno de 185km (USGS/NOAA, 1984).

TABELA 3.4 - LARGURA DAS BANDAS DO SENSOR TM/LANDSAT

BANDAS	LARGURA (μm)
1	0,45- 0,52
2	0,52- 0,60
3	0,63- 0,69
4	0,76- 0,90
5	1,55- 1,75
7	2,08- 2,35
6	10,40-12,50

FONTE: USGS/NOAA (1984), p. 4-1.

Ponzoni et al. (1986) empregou as bandas 3, 4 e 5 para avaliação de uma área queimada em cerrado (s.l.) através da detecção da marca no terreno, tendo Pereira (1988), utilizado estas bandas para avaliação de queimadas em floresta, na Amazônia. A banda 3 detecta radiação na faixa do visível e é sensível à absorção clorofiliana, permitindo a diferenciação de espécies de plantas; a banda 4 detecta radiação no infravermelho próximo e é utilizada na avaliação de biomassa e delineamento de corpos d'água; e a banda 5 detecta radiação no infravermelho médio, sendo sensível para medidas de teor umidade da massa foliar (USGS/NOAA, 1984).

As gravações das imagens TM/Landsat são feitas rotineiramente pelo INPE na estação de recepção de Cuiabá-MT; e posteriormente é executado um pré-processamento em Cachoeira Paulista-SP, de onde as imagens são fornecidas aos usuários em fitas magnéticas com uma quantização em 8 bits (256 níveis de cinza), e em papel fotográfico.

A órbita/ponto das imagens TM selecionadas foi a 223/69, sendo escolhidas datas de duas passagens consecutivas, 26/08/1989 e 11/09/1989, nas bandas 3, 4 e 5. As imagens TM foram utilizadas como verdade terrestre na

comparação com dados AVHRR, tendo-se estabelecido entre as duas datas o período de controle. A órbita/ponto 223/69 está compreendida entre as coordenadas 12°05'S a 14°00'S de latitude, e 49°20'W a 51°30'W de longitude, cobrindo parte dos Estados de Goiás, Tocantins e Mato Grosso.

Foram utilizadas imagens em fitas magnéticas, das duas datas, a partir das quais foi feita a avaliação espacial das áreas queimadas; e utilizou-se uma imagem de 11/09/89, em papel fotográfico, em composição colorida (bandas 3, 4 e 5 nas cores azul, verde e vermelho respectivamente), na escala de 1:250.000. Esta foi usada de modo auxiliar, pois permitiu a visualização de toda área de controle em uma escala que auxiliou na localização das queimadas, avaliadas posteriormente a partir dos dados das fitas magnéticas.

3.1.4 - EQUIPAMENTO E MATERIAL DE APOIO

Conforme já observado (Seção 3.1.1), a delimitação dos cerrados se fez com base no Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE/IBDF, 1988), com a escala de 1:5.000.000 e projeção Policônica. Para determinação da coordenada geográfica exata dos pontos de queimada na área de controle, foi utilizada a Carta Aeronáutica Mundial WAC-3139, Aragarças, de 1976, na escala de 1:1.000.000 e projeção Cônica Conforme de Lambert.

Para visualização, tratamento e classificação das imagens digitais AVHRR e TM, foi utilizado o Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM) desenvolvido pelo INPE. O SITIM é constituído basicamente por um microcomputador do tipo PC (com seus periféricos) e uma unidade visualizadora de imagens (UVI), composta de um "hardware" e um monitor de TV (Engespaço, 1988).

Para manipulação simultânea dos dados de classificação das imagens AVHRR com os do mapa da região dos cerrados, foi utilizado o Sistema Geográfico de Informações (SGI), desenvolvido pelo INPE para a integração e manipulação de grande quantidade de dados. O SGI é um sistema complementar ao SITIM, disponível no mesmo ambiente de trabalho (Engespaço, 1990).

3.2 - METODOLOGIA

Uma proposta inicial de metodologia, com cujas evoluções chegou-se à que foi utilizada no presente trabalho, foi apresentada por Pereira Jr. et al. (1989).

Dentro da metodologia, as imagens AVHRR/NOAA foram utilizadas para obter dados de queimadas em toda área de estudo, com uma maior frequência temporal, enquanto os dados TM/Landsat foram empregados para a obtenção de medidas espaciais mais exatas das queimadas em uma área e um período de controle. A metodologia é sintetizada no fluxograma apresentado na Figura 3.3; inicialmente foi digitalizado o Mapa de Vegetação e processadas as imagens AVHRR da estação seca de 1989, das quais foram obtidos os pontos de queimada; a partir destes dados foram obtidas as distribuições temporal e espacial das queimadas. O segundo passo foi, com base em uma região e um período com ocorrência de queimadas, selecionar uma área e um período de controle, a partir dos quais foram selecionadas as imagens AVHRR e TM para comparação dos dados. Com a classificação das queimadas nas imagens, foi determinada, através de uma análise de regressão, a relação espacial entre as queimadas classificadas no TM e no AVHRR, sendo calculada uma equação, que foi utilizada então para corrigir o valor inicial de área queimada de toda a região dos cerrados, obtida através do AVHRR. Com a comparação, também foi possível obter a abstenção e a confusão da classificação AVHRR.

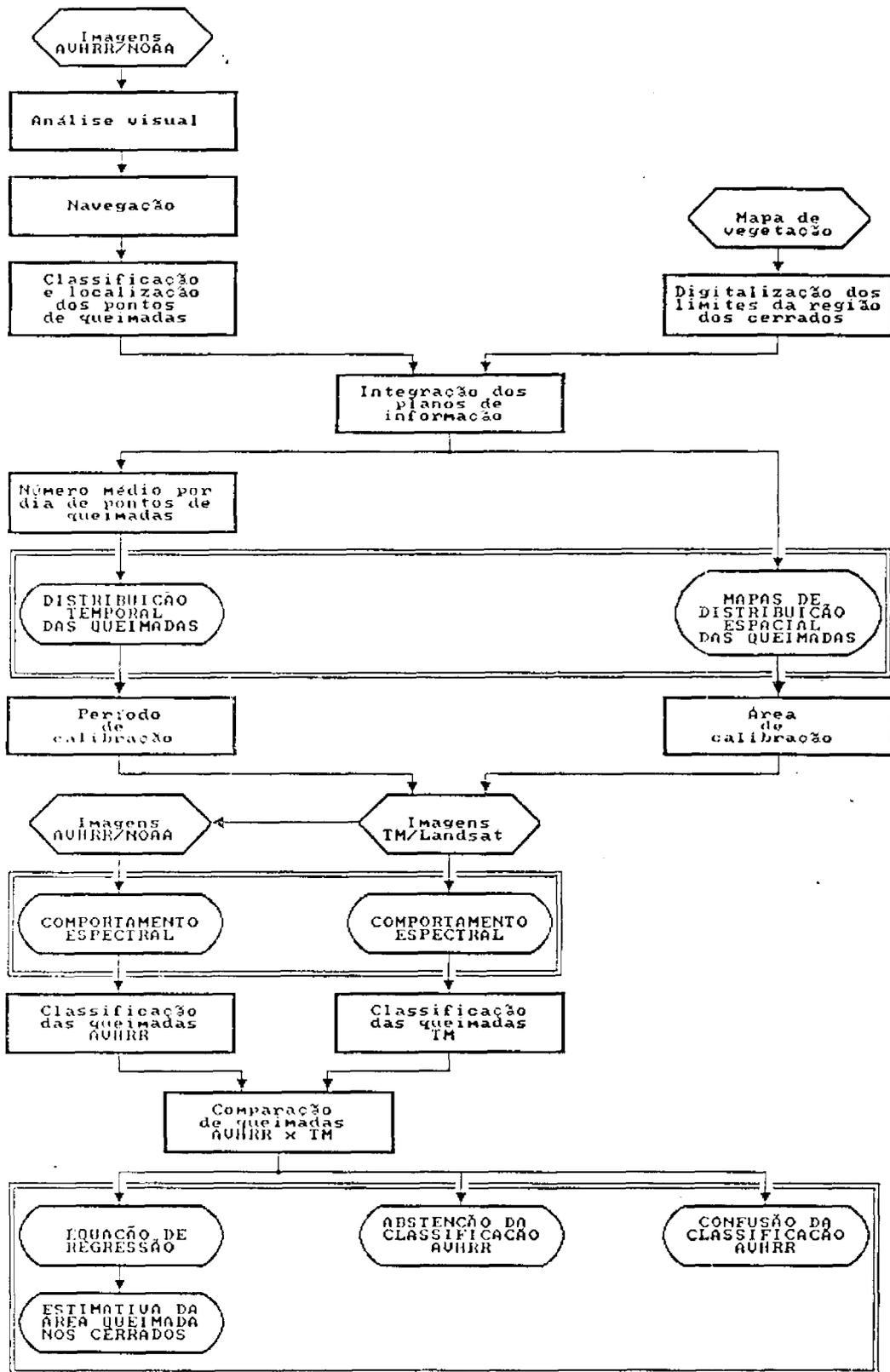


Fig. 3.3 - Fluxograma da metodologia.

3.2.1 - PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DIGITAIS AVHRR/NOAA

O processamento de imagens digitais AVHRR envolve três passos: 1) análise visual; 2) navegação e 3) classificação e localização das queimadas.

3.2.1.1 - ANÁLISE VISUAL

Inicialmente, a imagem digital AVHRR é visualizada por inteiro através do SITIM, sendo analisada em cada banda separadamente, bem como numa composição colorida das bandas 1, 2 e 3 nas cores vermelho, verde e azul, respectivamente. Esta composição foi baseada em estudo de Pereira (1988) sobre queimadas na Amazônia, onde, nesta composição, elas têm cores escuras; a vegetação aparece com tonalidade verde; as plumas de fumaça apresentam tons entre o vermelho e o amarelo, aparecendo com formas alongadas; e as nuvens com tons entre o branco e o amarelo.

As finalidades da análise visual são:

- 1) detectar possíveis falhas na imagem, como ruídos, causados por problemas com o sensor ou por problemas na recepção;
- 2) detectar a ocorrência de nuvens reflexivas à radiação solar na banda 3, que podem ter comportamento semelhante ao das queimadas;
- 3) localizar uma região em que existam pontos de controle, necessários à navegação da imagem AVHRR.

3.2.1.2 - NAVEGAÇÃO

As imagens AVHRR não foram corrigidas geometricamente, pois, segundo Flannigan (1985), uma correção geométrica envolve interpolações com os "pixels"

da imagem que podem levar a erros na classificação pela mudança de valor que o "pixel" tenha sofrido. A navegação é um processo dentro da correção geométrica, mas sua aplicação isolada não leva a mudanças no valor do "pixel".

A navegação, segundo Medeiros et al. (1986), é um processo analítico de determinação de parâmetros dinâmicos do satélite, necessários para gerar uma transformação matemática exata entre o sistema de referência do satélite (linha e coluna de uma imagem) e o de coordenadas geográficas (latitude e longitude). Portanto, com a navegação é possível saber a localização geográfica de um "pixel" da imagem, desde que se tenha conhecimento de sua linha e coluna; e vice-versa: dada uma localização, saber na imagem a correspondente linha e coluna.

Um programa computacional de nome AJUSTE foi desenvolvido por Figueiredo (1989a) para o passo inicial da navegação das imagens AVHRR em ambiente SITIM. Dentro do programa, as etapas são:

- 1) criação de um arquivo de parâmetros com os dados orbitais e de imageamento da passagem do satélite;
- 2) localização dentro da imagem AVHRR de pontos de controle (pontos com coordenadas geográficas conhecidas exatamente);
- 3) correção dos parâmetros utilizando os pontos de controle;
- 4) com a correção feita, é possível, através do processo de navegação, encontrar a localização geográfica dos "pixels" da imagem AVHRR de maneira exata.

A seguir é mostrado um exemplo do arquivo de parâmetros:

```
08091989 170000 171000 307.00 1 98.98 102.01 7230.0
```

Neste arquivo, os dados separados por um espaço em branco são, respectivamente:

- data da imagem;
- horário do início da gravação;
- horário do cruzamento com o Equador;
- longitude de cruzamento com o Equador;
- sentido da órbita (1 é ascendente);
- inclinação da órbita;
- período da órbita;
- raio da órbita.

Os parâmetros orbitais são fornecidos regularmente pela NOAA para a estação de recepção em Cachoeira Paulista-SP, e normalmente vem com imprecisões para a passagem sobre o Brasil pois, seus dados são de órbita anterior, podendo ocorrer mudanças nos parâmetros. Então é necessário fazer uma correção para que a navegação possa ser exata.

Conforme Figueiredo (1990), submetendo apenas dois parâmetros - tempo inicial da gravação e longitude de cruzamento com o Equador - a ajustes com base nos pontos de controle, existe garantia de exatidão na navegação.

Pereira et al. (1990) calcularam a exatidão da navegação em 3 "pixels" no sentido latitudinal, e em 1 "pixel" no sentido longitudinal. Portanto, a partir da obtenção das coordenadas geográficas do "pixel" da imagem através da navegação, podem-se executar os próximos passos metodológicos em uma condição cartográfica mais exata.

3.2.1.3 - CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DAS QUEIMADAS

Conforme comentado anteriormente (Seção 2.3.3.1), a banda 3 do AVHRR permite a detecção de queimadas ativas; e segundo Pereira (1988), Setzer et al. (1988) e Setzer e Pereira (1991), isto é possível em tempo quase real. Estes dois últimos trabalhos mostram que as queimadas são caracterizadas nas imagem como os níveis de cinza mais baixos, do nível de saturação ao nível 9 em uma escala de 256 níveis. Dentro do ambiente SITIM, a banda 3 foi utilizada para a classificação automática, sendo fornecidos os níveis de cinza característicos das queimadas (0 a 9), caracterizando o método do fatiamento. A classificação foi feita com resolução total, isto é, um "pixel" da imagem correspondeu a um "pixel" da UVI; isto porque, segundo Pereira (1988), a amostragem dos dados pode causar erros na classificação das queimadas, pois está-se subestimando ou superestimando o número de "pixels" classificados.

Figueiredo (1989b) recomenda que sejam desprezados os 72 "pixels" iniciais e os 72 finais de cada linha da imagem, para evitar as distorções que ocorrem nas bordas devido ao elevado FOV ($\pm 55,4^\circ$); um "pixel" na borda tem cerca de $16,6\text{km}^2$, ou seja, é 14 vezes maior que no nadir ($1,2\text{km}^2$), o que causa distorções na imagem. Portanto, foram utilizados os 1902 "pixels" centrais ("pixels" 73 a 1974) de cada linha que contém um total de 2048, correspondendo a uma faixa de cerca de 2100km.

Conforme observado por Pereira (1989), certos tipos de nuvens reflexivas à radiação solar na banda 3, que podem ter um tipo de comportamento semelhante às queimadas, ocorrem nas bordas da imagem; assim, quando se desprezam as bordas da imagem na classificação da banda 3

evitam-se confusões entre as queimadas e as nuvens reflexivas.

Para cada imagem AVHRR, com o programa FOCO de Figueiredo (1989c), feito para ambiente SITIM, foi feita a classificação das queimadas na banda 3 utilizando o método do fatiamento (níveis de cinza de 0 a 9), com a resolução total da imagem. Através do processo de navegação, foi gerado um arquivo com as coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos "pixels" classificados.

3.2.2 - AVALIAÇÃO DAS QUEIMADAS NA REGIÃO DOS CERRADOS COM DADOS AVHRR/NOAA

A avaliação das queimadas na região dos cerrados é feita com a obtenção da distribuição temporal e espacial das queimadas a partir dos dados AVHRR.

3.2.2.1 - NÚMERO DE PONTOS DE QUEIMADA

O primeiro passo para quantificar as queimadas foi a digitalização, através do sistema SGI, do Mapa de Vegetação (IBGE/IBDF, 1988) contendo a região dos cerrados e suas unidades de vegetação, conforme definido na Seção 3.1.1. Assim foi obtido no SGI um plano de informação formado pelas linhas com os limites dos cerrados e de suas unidades.

O segundo passo na quantificação foi determinar o número de pontos de queimada na região dos cerrados. Com o programa LEPT (Fernandes, 1990a), as coordenadas dos "pixels" classificados como queimadas, geradas anteriormente em latitude e longitude, foram transpostas para a projeção do mapa digitalizado; foi gerado então um arquivo formado pelos pontos de queimada na nova projeção, que consistiu em um segundo plano de

informações no SGI. Em seguida, com programa GERAREP (Fernandes, 1990b), foi feita a integração do plano das linhas da região dos cerrados com o plano de pontos das queimadas, gerando um arquivo com o número de pontos nos cerrados e em suas diferentes unidades de vegetação. Este passo foi executado para cada imagem AVHRR selecionada segundo o procedimento metodológico apresentado na Seção 3.1.2 (vide listagem das imagens no Apêndice A).

Conforme já citado (Seção 3.1.2), o programa GERAREP também foi utilizado para calcular a cobertura feita pela imagem AVHRR/NOAA sobre a região dos cerrados, o que possibilitou fazer a seleção das órbitas a serem utilizadas no trabalho.

3.2.2.2 - DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL: ESTIMATIVA DO NÚMERO MÉDIO DE PONTOS DE QUEIMADA POR DIA EM CADA SUBPERÍODO

As características orbitais dos satélites NOAA fazem com que, depois de um ciclo de 9 a 10 dias, o satélite volte a passar sobre aproximadamente a mesma longitude de cruzamento com o Equador; como conseqüências, dentro deste período de tempo ocorrem de 9 a 10 passagens vespertinas do satélite, e as órbitas de um dado ciclo são semelhantes às do ciclo seguinte.

Dentro de cada ciclo do satélite, as órbitas selecionadas para o trabalho (44°W a 63°W de longitude de cruzamento com o Equador) ocorrem 7 ou 8 vezes; portanto, vão existir 7 ou 8 imagens AVHRR em cada ciclo, desde que não tenham ocorrido problemas na recepção e gravação, assim como na imagem AVHRR. O término de cada ciclo é na órbita mais a leste (44°); assim, a partir do ciclo do satélite, foram determinados subperíodos dentro do período de estudo (Tabela 3.5).

Em cada subperíodo, tendo os arquivos o número de pontos de queimada e o número de imagens existentes, foi estimado o número médio de pontos por dia, o que permitiu a análise da distribuição temporal das queimadas no período de estudo.

TABELA 3.5 - SUBPERÍODOS DEFINIDOS PARA O ESTUDO DE QUEIMADAS COM O NÚMERO DE DIAS DE CADA SUBPERÍODO

SUB PERÍODO	VARIAÇÃO	Nº DE DIAS	Nº DE DIAS COM IMAGENS
1º	08/06 - 17/06	10	7
2º	18/06 - 27/06	10	6
3º	28/06 - 06/07	9	5
4º	07/07 - 16/07	10	7
5º	17/07 - 26/07	10	4
6º	27/07 - 04/08	9	7
7º	05/08 - 14/08	10	8
8º	15/08 - 24/08	10	5
9º	25/08 - 02/09	9	4
10º	03/09 - 12/09	10	4

3.2.2.3 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE QUEIMADAS

Para encontrar as regiões mais atingidas pelas queimadas, foi analisada a distribuição espacial dos pontos. Inicialmente, foram separados os subperíodos existentes em cada mês, de junho a setembro:

- junho: 1º, 2º;
- julho: 3º, 4º, 5º;
- agosto: 6º, 7º, 8º, 9º;
- setembro: 10º.

Quando um subperíodo tinha datas de dois meses diferentes, como acontece no 3º, 6º e 9º, foi verificado na listagem das imagens (Apêndice A) qual o mês que tinha maior número de imagens selecionadas, para definir em qual mês o subperíodo estava contido.

O próximo passo foi, através do sistema SGI, plotar os limites da região dos cerrados e a divisão política do Brasil; em seguida, foram selecionados e plotados os arquivos de pontos de queimada existentes para um dado mês. Este procedimento foi executado para os 4 meses, sendo gerados assim mapas mensais com a distribuição espacial das queimadas na região dos cerrados; também foi gerado um mapa para todo o período de estudo, plotando-se todos os arquivos de pontos, os limites dos cerrados com suas unidades e a divisão política do Brasil.

3.2.3 - COMPARAÇÃO DE DADOS DE QUEIMADAS DO AVHRR/NOAA COM DADOS DO TM/LANDSAT DA REGIÃO DOS CERRADOS

A fim de verificar e corrigir os dados de queimada obtidos através das imagens do AVHRR/NOAA, foi feita uma comparação com imagens do TM/Landsat, pois este sensor possibilita uma melhor observação espacial das áreas queimadas em função da sua melhor resolução espacial. Através da comparação, foi possível estabelecer uma relação entre estimativas de áreas queimadas obtidas de ambos os sensores, o que permitiu corrigir o valor inicial da área queimada nos cerrados, obtido com dados AVHRR.

3.2.3.1 - SELEÇÃO DE UMA ÁREA E DE UM PERÍODO DE CONTROLE

O primeiro passo na comparação foi selecionar uma área e um período de controle a fim de escolher as imagens TM e AVHRR a serem utilizadas.

A partir do Mapa de Vegetação e dos mapas de distribuição espacial das queimadas, foi selecionada uma subárea da região dos cerrados com as seguintes características:

- 1) maior número possível das unidades de vegetação da região dos cerrados;

- 2) ocorrência de queimadas;
- 3) abrangência de uma órbita/ponto de imagem TM, necessária para as comparações com as imagens AVHRR.

A área de controle foi definida então como a que foi abrangida pela órbita/ponto de imagem TM selecionada dentro desta subárea, portanto com dimensões de 185 x 185km.

Iverson et al. (1989) utilizaram um quadrante da imagem TM, com 92,5km x 92,5 km, como área de controle para um estudo de cobertura florestal com imagens AVHRR, numa área de 564.175km², ou seja, a área de controle correspondeu a 1,5% da área de estudo. Utilizando uma imagem TM para a região dos cerrados, supondo uma área aproximada de 2.000.000km², verificou-se que a área de controle corresponde a 1,7% da área de estudo, que é valor adequado, considerando o estudo citado.

A partir das estimativas da área queimada por subperíodo, foi escolhido um entre os três maiores em ocorrência de queimadas; dentro deste foi selecionada uma primeira imagem TM, com até 10% de cobertura de nuvens, e, em seguida, a imagem da passagem anterior à primeira TM. O intervalo de tempo entre as duas passagens do TM/Landsat ficou estabelecido como o período de controle no qual foram selecionadas as imagens AVHRR/NOAA pertencentes à listagem do Apêndice A.

3.2.3.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS QUEIMADAS

Com a finalidade de comparar o comportamento espectral das queimadas com dados de outros trabalhos, e para melhor classificar as áreas queimadas, foi feito o

estudo do comportamento espectral para os sensores AVHRR e TM.

3.2.3.2.1 - IMAGEM AVHRR/NOAA

Inicialmente, foi selecionada uma imagem AVHRR com as seguintes características:

- 1) data dentro do período de controle;
- 2) órbita entre as imagens selecionadas conforme a secção 3.1.2 (vide Apêndice A);
- 3) abrangência da área de controle;
- 4) área de controle na parte da imagem próxima ao nadir, o que definiu uma órbita que foi adotada para outras imagens selecionadas.

A fim de analisar o comportamento espectral das queimadas ativas em todo período de estudo, verificando eventuais mudanças, após a seleção da primeira imagem foram selecionadas outras dentro do período de junho a setembro, separadas por um intervalo de tempo de cerca de um mês, totalizando quatro. As órbitas selecionadas foram semelhantes à da primeira imagem, e em todas elas foi delimitada a subárea definida conforme a Seção 3.2.3.1, onde foi feito o estudo do comportamento espectral das queimadas.

Para o estudo, no SITIM, o primeiro passo foi extrair o histograma nas 3 bandas, tendo sido determinados na banda 3 os níveis de cinza característicos das queimadas. Depois, através do método do fatiamento (programa FATIA do SITIM), de posse dos níveis característicos, foram classificadas as queimadas na banda 3, formando então uma classe. A partir desta classificação, foram extraídos nas outras bandas os mesmos "pixels"

classificados, possibilitando uma análise estatística das 3 bandas, determinando então as características espectrais das queimadas nas bandas 1, 2 e 3 das imagens AVHRR. Também foi feita uma análise estatística para a área de controle como um todo. Em todo o processo, a imagem foi utilizada com resolução total.

3.2.3.2.2 - IMAGEM TM/LANDSAT

A imagem TM selecionada para análise espectral foi a da data posterior (11/09/1989). Para visualização das áreas queimadas, conforme recomendado por Ponzoni et al. (1986) e Pereira (1988), utilizou-se uma composição colorida com as bandas 3, 4 e 5 nas cores azul, verde e vermelho, respectivamente; as queimadas nesta composição aparecem com tonalidade magenta e vegetação verde.

Para classificação foi empregado o método do paralelepípedo (programa SINGLE do SITIM), conforme utilizado por Ponzoni et al. (1986) e Pereira (1988); na fase de treinamento, onde foram tomadas amostras da classe, a composição colorida foi utilizada para a visualização das queimadas. Após a classificação, a partir da classe queimada, foi feita uma análise estatística da classe queimada nas bandas 3, 4 e 5 para a extração das características espectrais. A imagem TM como um todo também foi analisada estatisticamente.

3.2.3.3 - COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS QUEIMADAS CLASSIFICADAS NAS IMAGENS AVHRR/NOAA E TM/LANDSAT

As áreas de queimadas classificadas na imagem TM/Landsat da data posterior foram utilizadas como verdade terrestre ao se estabelecer uma relação empírica com a classificação das áreas queimadas nas imagens AVHRR/NOAA da área e do período de controle, tendo a

relação sido representada através de uma análise de regressão simples de modelo linear. Já em outras comparações, foram determinadas a abstenção e a confusão da classificação do AVHRR em relação à classificação do TM.

O uso de duas imagens TM de passagens consecutivas, 28/08/89 e 11/09/89, foi necessário para determinar quais queimadas ocorreram no período de 16 dias entre as duas passagens, evitando a confusão de queimadas observadas na imagem posterior, as quais poderiam ser anteriores a esse período de 16 dias.

3.2.3.3.1 - RELAÇÃO ESPACIAL ENTRE AS ÁREAS QUEIMADAS

A partir de cada imagem AVHRR selecionada, foram extraídas as localizações e o número de queimadas para a área de controle, seguindo o procedimento adotado nas Seções 3.2.1 e 3.2.2.1. Através do SGI, para cada arquivo de pontos de uma data foi gerado um mapa da área de controle com as unidades de vegetação e com os pontos de queimada; devido ao grande número, estes pontos foram em seguida numerados para melhor organização.

O próximo passo foi tomar um ponto numerado de cada vez, da data posterior para a anterior. Através do SITIM, a imagem da data do ponto foi visualizada na banda 3 com classificação das queimadas, a fim de obter a localização do ponto na imagem. A imagem também foi visualizada na composição colorida e na banda 1, com vistas na observação de pluma de fumaça associada ao ponto, a fim de confirmar a exatidão da classificação. Em seguida, com o mesmo procedimento no SITIM, foi verificado nas imagens AVHRR das datas anteriores se na localização do ponto ocorriam outros pontos; assim determinavam-se os pontos que pertenciam a uma mesma queimada e verificava-se a continuidade em imagens de dias sucessivos.

Cada queimada detectada pelas imagens AVHRR foi localizada na imagem TM em papel, e, em seguida, na imagem TM digital da data posterior; nesta, com resolução plena, a queimada foi classificada e obtida sua área. Em seguida, através da análise visual e da classificação da imagem TM anterior, foi verificado se a queimada não havia ocorrido anteriormente ao período de 16 dias entre as duas imagens TM. Com este procedimento, foram observadas todas as queimadas em todos mapas, sendo assim verificados os dados de queimadas obtidos através do AVHRR.

Neste procedimento, na comparação das queimadas classificadas nas imagens AVHRR e TM com os pontos de queimada plotados nos mapas da área de controle, bem como na Carta Aeronáutica Mundial WAC-3139, foi possível fazer uma avaliação preliminar da exatidão da navegação utilizada nas imagens AVHRR.

Com os valores da classificação de cada queimada para ambos os sensores, foi utilizada uma análise de regressão simples, de modelo linear, para encontrar a equação que relaciona as áreas queimadas classificadas nas imagens TM/Landsat com as classificadas nos dados AVHRR/NOAA. Para análise dos dados foi utilizado o pacote estatístico STATGRAPHICS (Statistical Graphics, 1986); a equação de regressão do modelo de linear é:

$$Y = a + bX,$$

onde:

Y = variável dependente (dados AVHRR);

X = variável independente (dados TM);

a, b = coeficientes a serem estimados.

3.2.3.3.2 - ABSTENÇÃO E CONFUSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DAS QUEIMADAS NO AVHRR

Outras duas análises foram efetuadas: uma, para determinar a abstenção da classificação do AVHRR, verificando quantas das queimadas classificadas na imagem TM posterior, ocorridas no período de controle, deixaram de ser classificadas nas imagens AVHRR; e outra, para determinar a confusão da classificação do AVHRR, verificando quantas queimadas classificadas no AVHRR não foram classificadas na imagem TM.

Para determinar a abstenção, primeiro foram classificadas as imagens TM de 11/09/89 e 26/08/89 para determinar as queimadas que ocorreram no período de controle (16 dias); em seguida, cada queimada classificada na imagem TM posterior foi comparada com os mapas que continham os pontos de queimada, procurando as coincidências de localização, fazendo uma primeira verificação se o AVHRR havia detectado ou não a queimada; quando não havia pontos de queimadas na localização de uma queimada do TM, foi considerado abstenção; caso contrário, foi feita uma segunda verificação. Visto que a localização dos pontos de queimadas tem uma margem de exatidão, pois foi obtida a partir da navegação, para ter certeza da coincidência da queimada do AVHRR com a do TM, foi feita a visualização da classificação da queimada na banda 3 das imagens AVHRR, comparada com a classificação da queimada no TM, o que permitiu estabelecer a localização precisa da queimada em ambas as imagens. Com estas verificações foi determinada a abstenção da classificação das imagens AVHRR.

Para determinar a confusão, o procedimento foi semelhante. Após determinar, através das imagens TM, as queimadas ocorridas no período de controle, uma primeira verificação foi feita comparando cada ponto de queimada

observado nos mapas com a classificação da imagem TM; quando não havia queimada classificada no TM, foi considerado confusão. Caso contrário, foi feita uma segunda verificação visualizando a classificação da queimada na banda 3 das imagens AVHRR, comparada com a classificação da imagem TM, determinando precisamente se houve confusão ou não.

3.2.4 - ESTIMATIVA DA ÁREA QUEIMADA NA REGIÃO DOS CERRADOS

O primeiro passo foi encontrar um valor inicial da área queimada nos cerrados, a ser corrigida posteriormente pela equação encontrada na Seção 3.2.3.3.1. Para isto, o número médio de pontos de queimada por dia em cada subperíodo, calculado conforme o Seção 3.2.2.2, foi multiplicado pelo número de dias do subperíodo, sendo estimado o número de pontos de queimada num dado subperíodo. Em cada sub-período, o número de pontos de queimada foi multiplicado pela área do "pixel" da imagem AVHRR, que no nadir é $1,2\text{km}^2$, encontrando-se o valor inicial da área queimada na região dos cerrados, a partir dos dados AVHRR.

A fórmula a seguir sintetiza todo o processo:

$$Aq = \frac{n^{\circ}}{Di} \times Dp \times Ap,$$

onde:

Aq = valor inicial da área queimada a partir dos dados AVHRR, para um dado subperíodo;

$\frac{n^{\circ}}{Di}$ = número médio de pontos de queimada por dia;

n° = número de pontos em cada imagem;

Di = o número de dias com imagens;

Dp = o número de dias do subperíodo;
Ap = a área do "pixel" AVHRR no nadir ($1,2\text{km}^2$).

Com a equação obtida através da análise de regressão de modelo linear, que estabelece uma relação entre as áreas queimadas observadas no AVHRR e no TM, foi possível ajustar o valor inicial da área queimada em cada subperíodo. Para a região dos cerrados e para as unidades de vegetação, com a somatória das áreas queimadas em cada subperíodo, estimou-se a área queimada para o período de estudo. Com estes dados e com os de área da região dos cerrados, foi possível estimar quanto da área total foi queimado, e em qual unidade; com outro cálculo, o da divisão do valor de área queimada em cada unidade de vegetação pela sua área, pôde ser determinado em quais unidades a utilização do processo de queima foi mais abrangente.

Conforme Pereira (1988), a utilização da área do "pixel" com seu valor no nadir pode subestimar a área queimada, pois, como foi visto anteriormente, a área do "pixel" aumenta a medida que nos afastamos do nadir.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - OBSERVAÇÕES INICIAIS NO PROCESSAMENTO DAS IMAGENS AVHRR/NOAA

4.1.1 - QUALIDADE DAS IMAGENS

Na análise inicial das imagens AVHRR, visualmente não foi observado nenhum caso de nuvens reflexivas à radiação solar que pudessem ter um comportamento semelhante às queimadas na banda 3; e raramente houve a ocorrência de ruídos (3 casos). Portanto, as imagens utilizadas apresentavam boa qualidade.

Um fato ocorrido foi que, em possíveis 77 imagens no período de estudo, houve 16 ausências de datas, ou seja, 20,8%. A maioria dos casos de ausência (vide Apêndice A) aconteceram pelas constantes interrupções no funcionamento da estação receptora de Cachoeira Paulista-SP, ocorridas devido à deficiente manutenção do sistema. As datas de 30/08 e 10/09 não foram processadas devido a problemas nas fitas CCT, onde estavam gravadas as imagens.

4.1.2 - EXATIDÃO DA NAVEGAÇÃO

Para a navegação das imagens, não houve dificuldade em visualizar e marcar pontos de controle, visto que na estação seca ocorre baixa cobertura de nuvens nas imagens. Em geral, os pontos mais utilizados foram em grandes barragens, como Jupia e Sobradinho, confluências de grandes rios, como Tocantins com Araguaia, e do rio Grande com o rio Paranaíba, além de pontos da costa brasileira como a ponta do Boi, na ilha de São Sebastião (litoral de São Paulo). A identificação de tais pontos apresentaram melhor contraste na banda 2.

Apesar de não estar entre os objetivos prioritários do trabalho, procurou-se estabelecer a exatidão com que a navegação foi feita. Através de comparações entre pontos de queimada da área de controle plotados na Carta Aeronáutica Mundial WAC-3139 e nos mapas da área de controle, com os mesmos pontos nas imagens AVHRR e TM, foi encontrado erro máximo de 4 minutos, que correspondeu a 7 "pixels", e um erro médio de 2 minutos, que correspondeu a 3 "pixels"; no sentido latitudinal este último está de acordo com o estimado por Pereira et al. (1990), mas difere no sentido longitudinal, que foi estimado em 1 "pixel". Deve ser lembrado que a navegação foi feita com um programa computacional de 1989, o qual apresentava algumas imprecisões que foram corrigidas em versão mais atualizada do programa AJUSTE (Fernandes e Figueiredo, 1991), possibilitando o erro médio de 1 "pixel". Como o processamento das imagens AVHRR (Seção 3.2.1) foi feito já em 1989, não foi possível utilizar esta versão mais atual.

4.2 - AVALIAÇÃO DAS QUEIMADAS NA REGIÃO DOS CERRADOS ATRAVÉS DE IMAGENS AVHRR/NOAA

4.2.1 - DIGITALIZAÇÃO DAS UNIDADES DE VEGETAÇÃO DOS CERRADOS

Os limites das unidades de vegetação da região dos cerrados, definidos conforme a Seção 3.1.1, com base no Mapa de Vegetação do IBGE/IBDF (1988), foram digitalizados através do sistema SGI, gerando um plano de informações; no sistema, foi então produzido um mapa com as unidades de vegetação dos cerrados, que se encontra no Apêndice C, e foi calculada a área de cada unidade, conforme é apresentado na Tabela 4.1. O valor encontrado para a região dos cerrados corresponde a 91,5% do estimado por Azevedo e Adámoli (1988).

TABELA 4.1 - ÁREA DAS UNIDADES DE VEGETAÇÃO DOS CERRADOS

UNIDADE	ÁREA (km ²)	%
Cerradão	73513,37	3,4
Campo-cerrado	654726,00	29,9
Parque de cerrado	211007,80	9,6
Campo	133886,10	6,1
Cerrado com antropismo	447058,50	20,4
Áreas de tensão ecológica	371054,60	17,0
Áreas de tensão com antropismo	297045,70	13,6
Região dos cerrados	2188292,00	100,0

4.2.2 - QUANTIFICAÇÃO DAS QUEIMADAS

A partir da banda 3 de cada imagem, foi gerada a localização dos pontos de queimada, depois transformados através do programa LEPT (Fernandes, 1990a) em pontos de um plano de informação do SGI. O cruzamento do plano que contém os limites das unidades de vegetação dos cerrados com o plano de pontos de queimada através do programa GERAREP (Fernandes, 1990b) possibilitou determinar o número de pontos em cada dia por unidade, conforme apresentado na Figura 4.1 e no Apêndice B.

O número de pontos de queimada para a região dos cerrados, junto com o número de imagens existentes em cada subperíodo de estudo, possibilitou estimar o número médio de pontos por dia em cada um destes subperíodos, cujo resultado é apresentado na Tabela 4.2.

Analisando temporalmente a Tabela 4.2 e a Figura 4.2, observou-se que há uma tendência de crescimento da média diária de pontos desde o 1º subperíodo até o 8º; os subperíodos de maior incidência de queimadas ativas foram o 7º (de 05/08 a 14/08), 8º (de 17/08 a 24/08) e 10º (de 03/09 a 12/09). Isto confirma o observado por Coutinho (1980, 1990), que afirma que as ocorrências são

maiores em agosto devido ao avanço da estação seca, o que faz com que a vegetação herbácea de áreas naturais e das pastagens, assim como os restos vegetais, formem uma camada de material vegetal seco propício à ação do fogo.

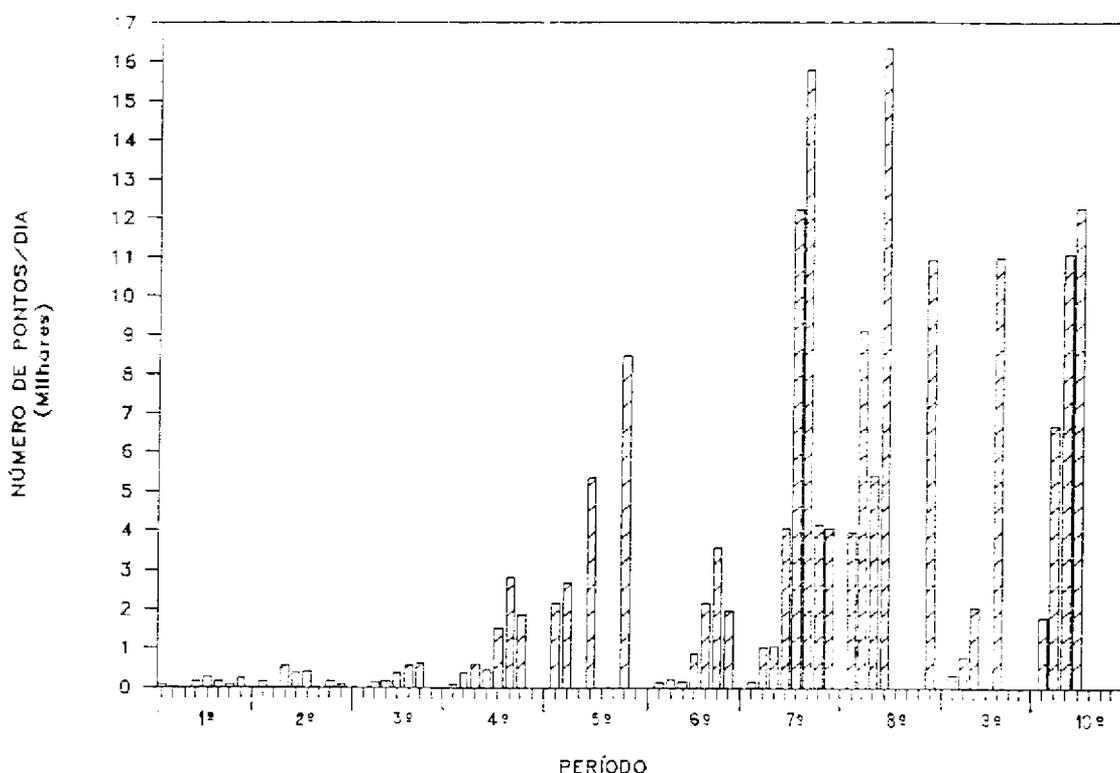


Fig. 4.1 - Número de queimadas por dia para a região dos cerrados na estação seca de 1989.

Uma observação deve ser feita com relação ao período de estudo. Conforme o exposto na Seção 3.1.1, em 1989 ocorreu uma estação seca de maio a setembro, mas com precipitações de junho a agosto acima da normal climatológica, causando uma estação seca com precipitações mais elevadas que em uma estação típica. Portanto, houve uma estação propícia à ocorrência de queimadas, mas o fato de ser uma estação seca com precipitações mais elevadas que a normal pode ter causado uma diminuição nas queimadas (e no número de pontos) em relação a uma estação típica.

TABELA 4.2 - ESTIMATIVA DO NÚMERO MÉDIO DE PONTOS DE QUEIMADA POR DIA PARA A REGIÃO DOS CERRADOS

SUB-PERÍODO	NÚMERO DE PONTOS	NÚMERO DE IMAGENS	MÉDIA DIÁRIA PONTOS
1º	928	7	132,6
2º	1711	6	285,2
3º	1800	5	360,0
4º	7633	7	1090,4
5º	18659	4	4664,8
6º	9049	7	1292,7
7º	42497	8	5312,1
8º	45786	5	9157,2
9º	14097	4	3524,3
10º	31763	4	7940,8

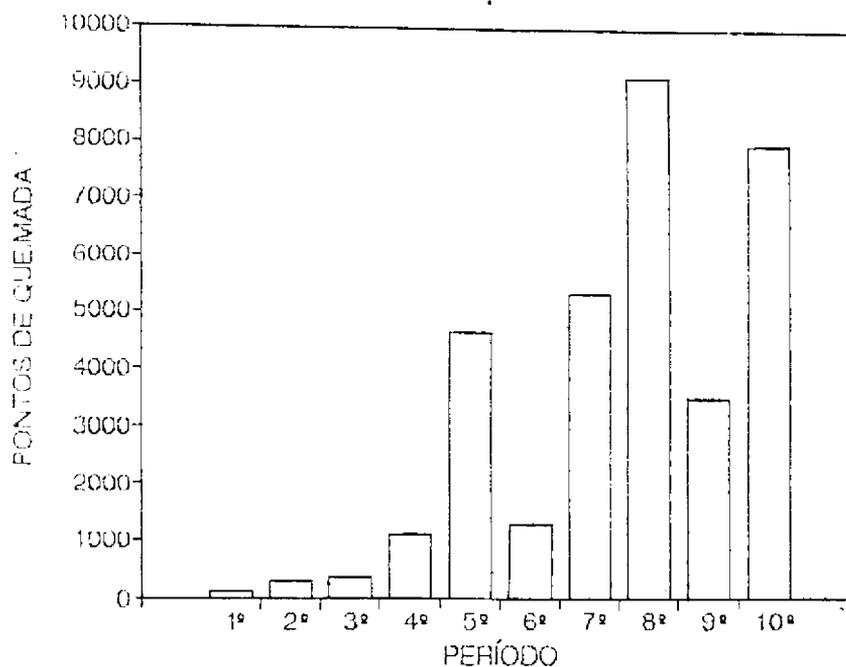


Fig. 4.2 - Distribuição temporal das queimadas para a região dos cerrados na estação seca de 1989.

Com respeito ao cálculo do número médio de pontos por dia em cada subperíodo, algumas considerações também devem ser feitas. A primeira é que, conforme é

mostrado na Tabela 3.3, apenas as órbitas com longitude de cruzamento com o Equador próximas a 54° oeste possibilitam uma cobertura de 100% da região dos cerrados; portanto, para a maioria das órbitas (mais de 80%), a imagem AVHRR não cobre totalmente os cerrados, o que impede a detecção de todas as queimadas ativas no momento da passagem do satélite; portanto, o número de pontos detectado na maioria das órbitas é uma subestimativa do número de pontos de queimada da região dos cerrados; assim, a média diária de pontos por subperíodo também é uma subestimativa.

Outra consideração é que, conforme já ressaltado na Seção 2.3.3.1, o sensor AVHRR detecta as queimadas ativas no momento da passagem do satélite, podendo não detectar queimadas ocorridas antes ou depois da passagem; portanto, o número de pontos detectados em cada órbita é uma subestimativa do número de pontos de queimada; assim, este é outro fator que contribui para que a média diária de pontos seja uma subestimativa.

Os dados dos dias 1^o e 02/09 (9^o período) e 11 e 12/09 (10^o período) foram considerados anômalos, pois tinham mais de 100.000 pontos, o que implicaria uma área queimada de aproximadamente 120.000km^2 em um dia, ou seja, 5,5% da área da região dos cerrados teria sido queimada em um só dia. Foi considerado que nestas datas estava havendo confusão com reflexão de radiação solar em solo exposto; portanto, estes dados não foram utilizados para o cálculo de queimadas.

Através da Figura 4.1 e do Apêndice B, pode ser observado que, em todos os subperíodos, as duas primeiras datas dentro de cada subperíodo apresentaram número de pontos inferior às demais; em 80% dos casos (com exceção do 2^o e 4^o período), as três primeiras datas do subperíodo apresentaram número de pontos inferior às demais

datas. As três primeiras datas do subperíodo foram de imagens que cobriram a parte leste da região dos cerrados; portanto, esta região apresentou, no período de estudo, menor número de queimadas que a parte oeste.

Pela Figura 4.1 e Apêndice B pode ser observado que ausência de órbitas ocorreram em quase todos os subperíodos de estudo, com exceção do 6º e 7º. Os subperíodos 5º, 8º, 9º e 10º concentraram 70% das ausências, sendo que nestes, 93% não estavam entre as três primeiras órbitas do subperíodo, as quais são as que apresentaram menor número de queimadas, conforme visto no parágrafo anterior. Portanto, para estes subperíodos, pode ter ocorrido uma subestimativa do número de pontos de queimada e da média diária de pontos nos cerrados.

4.2.3 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS

Através do sistema SGI, foram produzidos os mapas contidos nos Apêndices D a H. Um deles, o mapa D, mostra a distribuição espacial dos pontos de queimada no período de estudo sobre as unidades de vegetação dos cerrados. Os mapas de E a H apresentam a distribuição das queimadas nos meses de junho, julho, agosto e setembro, respectivamente, no limite da região dos cerrados. Com estes mapas e com o auxílio do Mapa de Vegetação do IBGE/IBDF (1988), foi feita a análise da distribuição espacial das queimadas.

Os pontos de queimada apresentaram-se distribuídos por quase toda a região dos cerrados, com exceção de região próxima do Pantanal Matogrossense; os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Piauí e Mato Grosso do Sul apresentaram menor concentração de pontos. Foram encontradas áreas onde os pontos de queimada ocorreram concentrados nos cerrados, as quais são apresentadas na

Tabela 4.3, sendo também listada as rodovias próximas e as unidades de vegetação destas áreas.

Uma região aproximadamente limitada pelas rodovias BR-153 (Belém-Brasília) e BR-158, ocupando o leste do Mato Grosso, oeste de Tocantins e oeste de Goiás, apresenta pontos de queimadas distribuídos por toda área, mas com concentração menor que das áreas citadas na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - ÁREAS DA REGIÃO DOS CERRADOS COM PONTOS DE QUEIMADA CONCENTRADOS NA ESTAÇÃO SECA DE 1989

ESTADO	REGIÃO	PONTO CENTRAL	RODOVIA	UNIDADES DE VEGETAÇÃO
Maranhão	sul	07°30'S/46°00'W	BR-230	parque de cerrado, campo-cerrado
Tocantins	leste-central	10°30'S/46°30'W	--	parque de cerrado, campo-cerrado, campo
Bahia	oeste-central	12°30'S/46°00'W	BR-020	parque de cerrado, campo-cerrado
Goiás	sul-central	17°30'S/50°30'W	BR-060	área de tensão com e sem antropismo, área de cerrado com antropismo
Mato Grosso	centro-oeste	14°00'S/57°00'W	BR-364 BR-163	área de tensão ecológica, área de cerrado com antropismo, campo-cerrado
Mato Grosso	centro-leste	14°00'S/53°00'W	BR-070 BR-158	campo-cerrado, área de cerrado com antropismo, área de tensão ecológica

A presença de rodovias na maioria destas áreas é um indicativo da presença do homem, podendo então ter ocorrido ação antrópica, inclusive com a utilização de queimadas. A região oeste da Bahia e sul do Maranhão caracterizaram-se pela implantação de projetos agropecuários durante a década de oitenta, devendo as queimadas nestas áreas, em sua maioria, terem sido utilizadas na abertura de novas áreas agrícolas, na limpeza de restos culturais e no manejo de pastagens implantadas.

No Estado de Tocantins (abrangido quase totalmente pela região dos cerrados), assim como no oeste-central da Bahia, sul do Maranhão e sul-central de Goiás, foi observado que de junho para agosto houve aumento na concentração e expansão dos pontos de queimada para toda área abrangida por estas regiões.

Para as áreas com concentração de queimadas no Mato Grosso, houve expansão e aumento de concentração de junho para julho, mas não foi constatado este fato em agosto, ocorrendo apenas expansão na parte mais oriental do estado. Conforme já observado na Seção 3.1.1, a estação seca de 1989 teve índices pluviométricos superiores à normal climatológica, e no Estado do Mato Grosso as precipitações em agosto foram de 50 a 250mm superiores à normal; conforme dados do Boletim Agroclimatológico (1989), a precipitação em duas estações (Figura 4.3) foi mais que 900% superior à da normal, sendo esta uma provável explicação para o não aumento das ocorrências de queimadas.

Foi observado que as áreas com concentração de queimadas, além de ocorrer nas unidades de vegetação com ação antrópica, também ocorreram nas formações remanescentes de vegetação natural, do tipo campo-cerrado, parque de cerrado, campo e nas áreas de tensão ecológica. Uma observação inicial a este respeito é que as unidades de vegetação foram definidas com base no Mapa de Vegetação do IBGE/IBDF de 1988, o qual foi gerado com base em dados coletados entre os anos de 1973 a 1983 pelo projeto RADAMBRASIL; é fato óbvio que entre o período de coleta dos dados do RADAMBRASIL e dos dados de queimadas (1989) houve a ocorrência de novos antropismos, nas formações remanescentes.

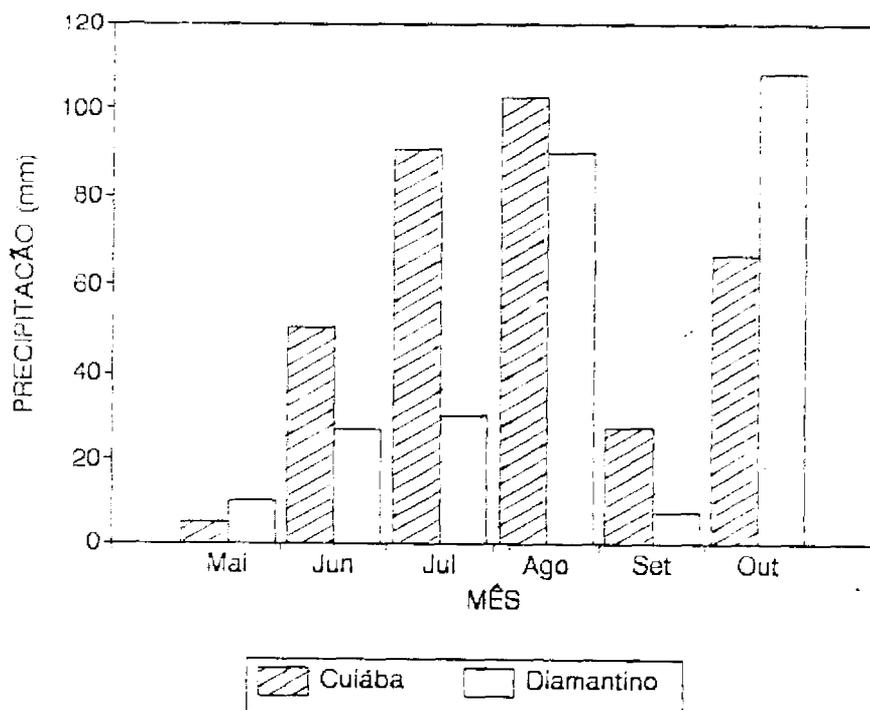


Fig. 4.3 - Precipitação mensal na estação seca de 1989 para a região dos cerrados no Estado de Mato Grosso.

Conforme já comentado, um fato que indica a presença do homem nestas regiões são as rodovias próximas às áreas com queimadas concentradas; no oeste-central do Estado da Bahia e sul do Maranhão houve a implantação de projetos agropecuários durante a década de oitenta, com a ocorrência de queimadas, o que confirma a ocorrência de ação antrópica em áreas mapeadas no Mapa de Vegetação do IBGE/IBDF (1988) como formações remanescentes de vegetação natural da região dos cerrados. Tal fato, aliado à presença humana nas áreas com ação antrópica com concentração de queimadas, confirma que o homem é o principal causador de queimadas nos cerrados, o que está de acordo com o observado por Coutinho (1980, 1990), Gillon (1983) e Frost e Robertson (1987).

As áreas de tensão ecológica onde ocorreram queimadas concentradas são aquelas onde há contato entre

cerrado e floresta estacional. Estas áreas devem ter sido utilizadas em atividades de novos projetos agropecuários, visto que são formações próximas do ótimo florestal e não apresentam estrato herbáceo significativo; não podem, então, ser utilizadas como pastagens naturais, onde o fogo é utilizado no manejo. Assim, a ocorrência de queimadas nestas formações só é justificada por três motivos:

- 1) na queima de restos vegetais após a abertura de áreas de cultivo, onde a vegetação arbóreo-arbustiva foi recém derrubada;
- 2) no manejo de pastagens artificiais;
- 3) e em menor escala, na queima de restos de culturas agrícolas.

As áreas de campo-cerrado, parque de cerrado e de campo podem ter sido ocupadas por projetos agropecuários, e podem ter sido utilizadas como pastagens naturais onde as queimadas são empregadas no manejo. Para as unidades de vegetação com presença de antropismo, a ocorrência de queimadas é explicada pelo uso do fogo no manejo de pastagens artificiais, e numa menor escala, na queima de restos de culturas em áreas agrícolas.

Uma observação mais abrangente dos mapas mostra que as regiões de concentração de queimadas ocorrem acima do paralelo 15°S; isto é um indicativo de onde está ocorrendo a expansão da fronteira agrícola na região dos cerrados.

4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE QUEIMADAS DETECTADAS EM IMAGENS AVHRR/NOAA E TM/LANDSAT

4.3.1 - SELEÇÃO DA ÁREA E PERÍODO DE CONTROLE

A partir do Mapa de Vegetação do IBGE/IBDF (1988) e dos mapas de distribuição espacial das queimadas, foi selecionada uma subárea da região dos cerrados que satisfizesse as características citadas na Seção 3.2.3.1 (Figura 4.4); a subárea com dimensão de 330km x 330km, cobre parte dos Estados de Goiás (GO), Tocantins (TO) e Mato Grosso (MT), sendo limitada aproximadamente pelas coordenadas 11°45'S a 14°45'S e 48°30'W a 51°30'W, e contém a maior parte das diferentes unidades de vegetação da região dos cerrados, a saber, campo-cerrado, parque de cerrado, áreas de cerrado com ação antrópica, áreas de tensão ecológica e áreas de tensão ecológica com ação antrópica. Conforme a Tabela 4.1 (Seção 4.2.1) estas unidades são as que apresentam maior expressão em termos territoriais (90,5% da área total dos cerrados). Como pode ser observado nos mapas de distribuição espacial das queimadas, esta área não se encontra em núcleos com ocorrência de queimadas concentradas.

A órbita/ponto de imagem TM/Landsat abrangida nesta subárea é a 223/69 (Figura 4.5), compreendida entre as coordenadas 12°05'S a 14°00'S de latitude, e 49°20'W a 51°30'W de longitude; tal órbita/ponto limitou a área de controle, e como uma imagem TM abrange 185km x 185km, foi esta a área usada para o estudo de comparação, correspondente a 1,6% da área da região dos cerrados. Ela contém as mesmas unidades de vegetação e está dentro dos mesmos estados da subárea. Com o auxílio da Tabela 4.2 foi selecionada uma data de imagem TM entre os três subperíodos com maior ocorrência de queimadas nos cerrados, ou seja, 11/09/89; a outra data da

imagem TM foi da passagem anterior à primeira, de 26/08/89. O período de controle ficou então limitado por estas duas datas.

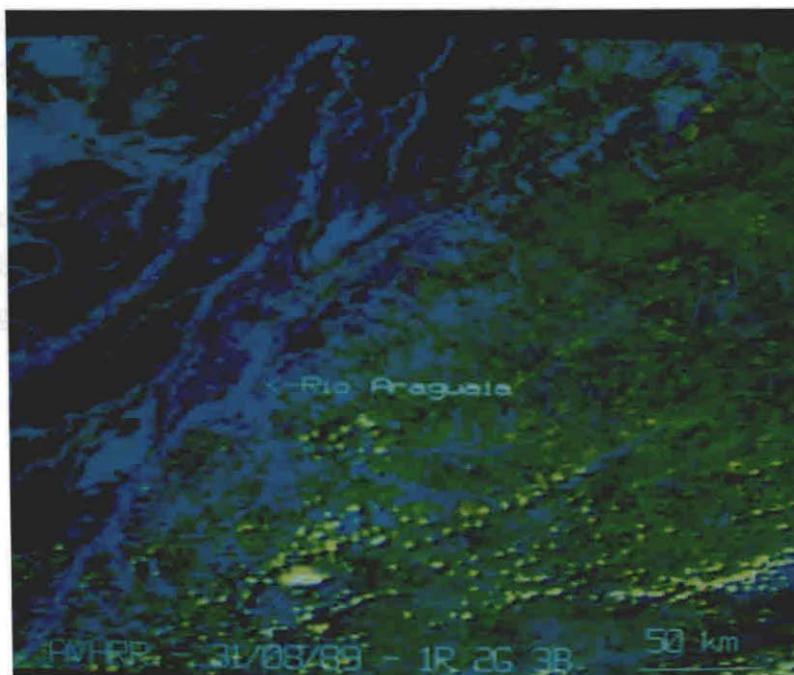


Fig. 4.4 - Imagem AVHRR/NOAA de 31/08/89, em uma composição colorida (banda 1, vermelho; banda 2, verde; banda 3, azul) correspondente à subárea.

Dentro do período de controle, de 26/08/89 a 11/09/89, foram tomadas as imagens AVHRR que pertenciam à lista de imagens selecionadas para o período de estudo (Apêndice A). Nas imagens foi delimitada digitalmente a subárea, com dimensão de 330km x 330km (englobando a imagem TM), que corresponde a 5,0% da área total da região dos cerrados. Deve ser notado que, como o horário da passagem da imagem TM de 11/09/89 foi 9:45h e a AVHRR desta mesma data foi 13:40h, esta última não pertence ao período de controle.

Como observado anteriormente, a área de controle não está em regiões com queimadas concentradas, mas apresenta ocorrência de queimadas segundo os mapas de

distribuição espacial (Apêndices D a H). O fato de não estar em áreas com concentração de queimadas acabou sendo vantajoso para o estudo, visto que um elevado número de queimadas levaria a dificuldades de localização das mesmas queimadas em imagens AVHRR/NOAA e TM/Landsat. Cabe ainda mencionar que as regiões com queimadas concentradas não satisfaziam todas as características citadas na Seção 3.2.3.1, ou seja, apesar de apresentarem ocorrência de queimadas, não apresentavam a maioria das unidades de vegetação e não abrangiam uma órbita/ponto de imagem TM com baixa cobertura de nuvens.

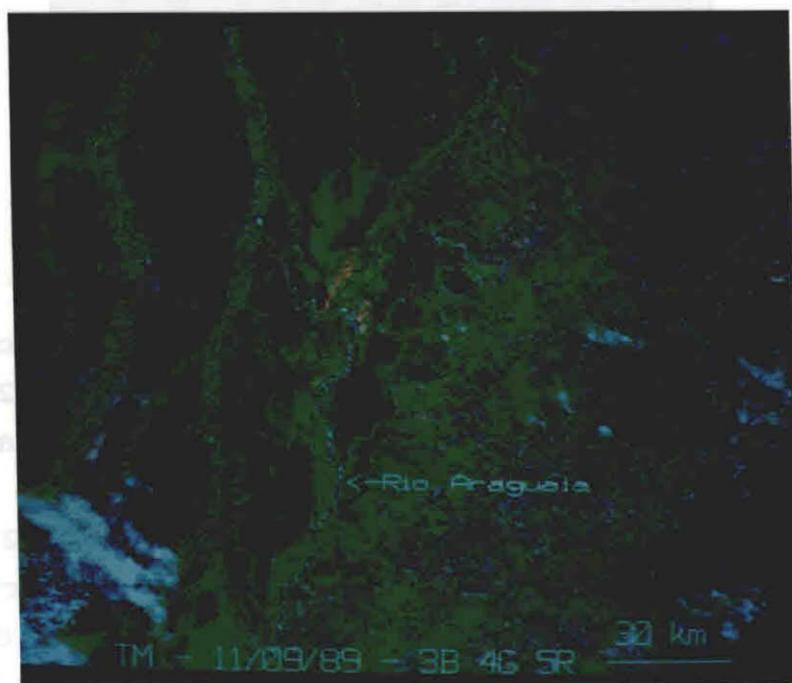


Fig. 4.5 - Imagem TM/Landsat, órbita/ponto 223/69, de 11/09/89, em uma composição colorida (banda 3, azul; banda 4, verde; banda 5, vermelho) correspondente à área de controle.

Para compreender as dificuldades de localização, tem-se que levar em consideração algumas características dos sensores que influenciam na avaliação espacial de queimadas individuais:

- 1) o TM tem melhor resolução espacial que o AVHRR (30m contra 1,1km);
- 2) o TM/Landsat faz a detecção das marcas das queimadas deixadas no terreno enquanto, com o uso da banda 3 do AVHRR/NOAA, ocorre uma visão instantânea, que faz a detecção de queimadas ativas no momento da passagem do satélite, podendo não detectar queimadas ocorridas antes ou depois da passagem (Pereira, 1988; Robinson, 1991).

Com base nestes fatos, Pereira (1988) concluiu que o TM/Landsat permite avaliações espaciais, como da forma e da área, mais exatas que o AVHRR/NOAA, sendo seus dados utilizados no presente trabalho como verdade terrestre.

Uma primeira dificuldade que surge das diferenças entre as imagens é na identificação de pontos de referência das queimadas quando, na imagem AVHRR, eles têm tamanho menor que o do "pixel" AVHRR ($1,2\text{km}^2$). Os pontos de referência são importantes porque possibilitam a localização das queimadas de modo preciso tanto na imagem TM como AVHRR. Quando estes pontos, como áreas de tensão ecológica, lagoas e rios, são de tamanho menor que o "pixel" AVHRR, não é possível sua identificação na imagem.

Quando há poucas queimadas nas imagens, a referência menor que $1,2\text{km}^2$ não se torna um problema. Contando com a ajuda de navegação das imagens AVHRR, desde que as queimadas estejam separadas por distância maior que 7 "pixels" (erro máximo da navegação), e que a imagem TM esteja corrigida geometricamente, não é necessário nem a ajuda dos pontos de referência para localizar as queimadas em ambas as imagens. Já com a navegação, e se houver possibilidade de contar com pelo menos três pontos de referência em ambas imagens, com os quais se possa empregar

o processo de triangulação, torna-se ainda mais fácil encontrar a localização precisa das queimadas.

Do contrário, quando ocorrem queimadas próximas, com uma distância a separá-las menor que a exatidão da navegação, não é possível fazer a localização de modo preciso no AVHRR se não existem pontos de referência para ser feita uma triangulação; e mesmo que seja possível fazer uma triangulação, esta tem um erro de 1 "pixel" nas imagens AVHRR se for executada de modo preciso; portanto, queimadas separadas no TM por uma distância menor ou igual a 1 "pixel" AVHRR não podem ser localizadas de modo preciso nas imagens AVHRR. Três casos são possíveis quando há duas queimadas classificadas no TM, mas não há meio de distingui-las na imagem AVHRR.

No primeiro caso, existem duas queimadas classificadas na imagem TM (verdade terrestre) separadas por uma distância maior que um "pixel" AVHRR (até 2km), e na imagem AVHRR há um "pixel" classificado como queimada. Neste caso, o AVHRR detectou apenas uma queimada; portanto, devido ao erro do processo de triangulação, não é possível determinar a correspondência precisa com uma das queimadas detectadas pelo TM.

O segundo caso ocorre quando um "pixel" foi detectado pelo AVHRR como queimada, e na imagem TM são encontradas duas queimadas próximas, separadas por uma distância menor que 1 "pixel" AVHRR. Neste caso podem acontecer duas situações:

- 1) apenas uma queimada foi detectada pelo AVHRR, e não há como saber qual das duas queimadas reais foi a detectada;
- 2) devido à menor resolução espacial do AVHRR, as duas foram detectadas no mesmo "pixel".

Aqui, além da incerteza intrínseca a cada exemplo, há ainda a confusão de ser impossível determinar qual das duas situações está ocorrendo.

O terceiro caso ocorre quando dois "pixels" AVHRR contíguos são classificados como queimadas, e há duas queimadas classificadas no TM, separadas por uma distância menor que 1 "pixel"; neste caso podem ocorrer as seguintes situações:

- 1) as duas queimadas foram detectadas em "pixels" distintos do AVHRR, e é impossível determinar qual a correspondência precisa com as queimadas no TM;
- 2) devido à baixa resolução espacial do AVHRR, uma queimada foi detectada nos dois "pixels" AVHRR, sendo a outra não detectada.

Também aqui, além da incerteza intrínseca a cada exemplo, há ainda a confusão de ser impossível determinar qual das duas situações está ocorrendo.

Os exemplos acima consideraram a existência de apenas duas queimadas TM próximas. Esta problemática tornar-se-á mais complexa se houver várias queimadas próximas uma da outra, separadas na imagem TM por uma distância menor ou igual a 1 "pixel" AVHRR. Nestes casos, além dos pontos de referência para a triangulação, somente com a existência de pontos identificáveis na imagem AVHRR, próximos às queimadas, poderia ser estabelecida a precisa correspondência entre as mesmas queimadas detectadas no AVHRR e TM.

Portanto, em face do demonstrado, justifica-se o uso de uma área de controle fora de regiões com as queimadas concentradas.

4.3.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS QUEIMADAS ATIVAS EM IMAGENS AVHRR/NOAA

Com a finalidade de comparação com dados de outros trabalhos, e procurando melhorar estes dados, foi feita uma análise do comportamento espectral das queimadas ativas na subárea da região dos cerrados. Para tal, conforme a Seção 3.2.3.2.1, foram selecionadas quatro imagens no período de junho a setembro de 1989 (dentro da estação seca): 14/06, 13/07, 11/08, 08/09.

4.3.2.1 - ANÁLISE RADIOMÉTRICA NA BANDA 3

Conforme Pereira (1988), as queimadas ativas são caracterizadas na banda 3 ($3,55-3,93\mu\text{m}$) do AVHRR pelos níveis de cinza mais baixos, os quais correspondem às temperaturas mais elevadas. Em trabalhos posteriores, Setzer et al. (1988) e Setzer e Pereira (1991), determinaram que, em 256 níveis de cinza da imagem, as queimadas estavam limitadas entre o nível de cinza de saturação (aproximadamente 320K) e o nível 9 (316K), havendo maior frequência no nível 9. Visando confirmar estes dados em função da mudança do satélite utilizado naqueles trabalhos para este (NOAA-9 para NOAA-11), foi feita uma análise da distribuição radiométrica da banda 3 do AVHRR. Para tal, em primeiro lugar foi extraída a frequência de ocorrência dos níveis de cinza para as imagens selecionadas.

Como pode ser observado na Figura 4.6, os níveis de cinza mais baixos, de 0 a 10, apresentam um comportamento distinto dos demais níveis, e o nível 10 aparece com maior frequência, o que caracteriza um pico nesta faixa de níveis. Uma curva pode ser associado a esta faixa, a qual caracteriza as queimadas. A partir desta constatação, foram examinadas 23 queimadas na imagem de 08/09/89, na área de controle, a fim de verificar como estava ocorrendo a

distribuição espacial dos níveis de cinza caracterizados como queimadas. Na observação dos dados (Figura 4.7), ficou confirmado que as queimadas ativas são caracterizadas pelos níveis de cinza mais baixos, e que o nível de cinza 10 estava presente em diferentes "pixels" junto a áreas queimadas. Assim foi confirmado que, para os dados na estação seca de 1989, com o novo satélite NOAA-11, houve a mudança do pico de frequência do nível 9 para o 10 e mudança da faixa de níveis de cinza característicos das queimadas ativas para o intervalo de 0 (320K) a 10 (315K).

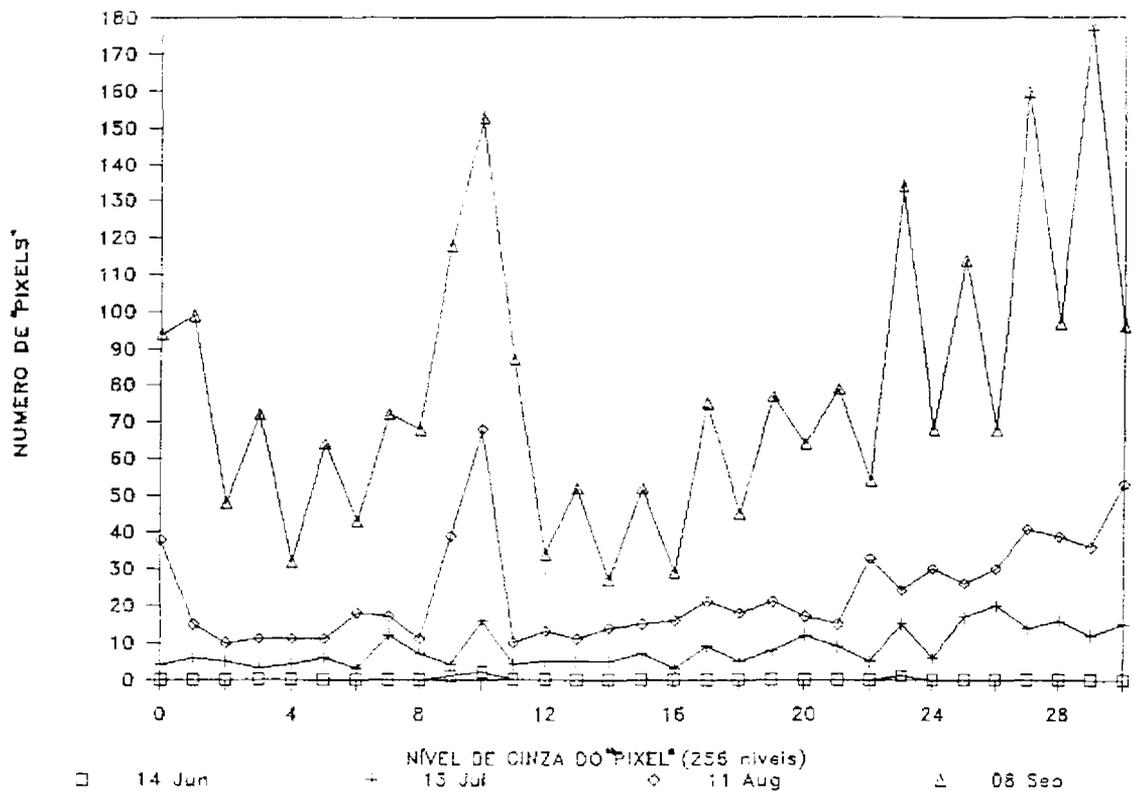


Fig. 4.6 - Histograma com a frequência de ocorrência dos níveis de cinza em 4 imagens da banda 3 do AVHRR na subárea, para a estação seca de 1989.

99	102	93	100	112	99	95	103	117	125	128
91	90	89	9	10	10	95	103	117	125	128
87	112	22	10	10	10	10	10	8	94	117
103	9	10	10	9	10	10	72	77	120	126
95	15	5	86	91	83	82	83	99	122	123
92	82	108	116	96	88	85	83	95	118	124

78	82	85	89	82	73	69	69	71	72	69	69	81
80	83	82	27	29	48	0	1	36	66	62	71	89
83	84	62	12	1	8	0	16	3	20	9	27	104
77	41	2	0	12	18	11	12	5	1	9	9	92
13	5	9	16	8	9	42	47	68	10	10	7	90
59	41	30	24	9	34	76	96	9	10	0	101	116
106	83	65	25	8	27	0	54	63	73	90	92	109
103	91	73	122	127	10	10	9	78	3	7	120	119
84	83	90	82	43	10	8	68	75	1	64	123	121
75	85	85	76	84	82	0	53	112	115	114	98	86
68	91	84	78	90	95	69	95	108	102	95	113	117

60	78	81	86	94	84	62	66
73	72	84	87	38	30	47	65
34	45	25	5	12	79	95	65
78	69	8	7	78	97	96	59
93	79	69	70	6	1	65	78
86	90	87	78	9	10	23	87
90	78	58	53	68	79	91	96
95	50	45	79	92	80	91	95

86	53	28	26	55	70	68	68	84
95	75	29	1	11	31	55	59	62
106	93	90	68	11	5	8	21	52
134	111	78	62	26	10	18	46	70
132	97	68	60	56	66	76	90	76
68	62	32	27	20	9	11	29	59
73	38	5	4	8	2	18	55	64
38	26	18	23	40	58	87	97	100

Fig. 4.7 - Distribuição dos níveis de cinza de algumas queimadas na banda 3 da imagem AVHRR de 08/09/89, na área de controle.

Posteriormente, através da comparação das classificações das queimadas ativas na imagem AVHRR de 08/09/89 e das áreas já queimadas na TM de 11/09/89, assim como pela ocorrência de plumas de fumaça junto às queimadas ativas, foram verificadas eventuais confusões que podem ter ocorrido na classificação da imagem AVHRR utilizando os níveis de cinza de 0 a 10 da banda 3 como os característicos das queimadas ativas. Esta verificação foi quanto a erros da detecção, como confusão com reflexão de radiação solar por solo exposto, e não quanto a medidas espaciais.

Verificou-se que, das 23 queimadas da imagem AVHRR, 4 (17,4%) não puderam ser verificadas pela ocorrência de nuvens na imagem TM e por não apresentarem plumas de fumaça; 16 foram confirmadas, ou seja 69,6% (84,2% das queimadas possíveis de verificação); e 3 não foram identificadas como queimadas no TM e nem apresentaram fumaça; portanto, há uma incerteza de 13,0% (15,8% das queimadas possíveis de verificação). A não ocorrência de plumas de fumaça na imagem AVHRR não invalida a existência de uma queimada, visto que a fumaça, no momento da passagem do satélite, já pode estar dispersa e não ser detectada. Ainda, se a queimada for pequena, a quantidade de fumaça é pouca, o que torna a pluma de dimensão menor e com dispersão mais rápida, que impossibilita a detecção pelo AVHRR. É importante mencionar que a própria classificação de queimadas nas imagens TM está sujeita a falhas, o que será abordado com mais detalhes na Seção 4.3.3.

Foi calculado que, ao utilizar a faixa de 0 a 9 para níveis de cinza característicos das queimadas ativas, ocorre uma subestimativa no número de "pixels" de 20,2% em relação ao uso da faixa de 0 a 10 (Tabela 4.4). Portanto, para obter dados de queimadas no ano de 1989, a partir de junho, é necessário o uso desta nova faixa de

valores; se isto não for possível, será preciso empregar alguma forma de correção.

TABELA 4.4 - COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE "PIXELS" DA FAIXA DE NÍVEIS DE 0 A 9 COM A DE 0 A 10 EM IMAGENS DA BANDA 3 DO AVHRR NA ESTAÇÃO SECA DE 1989

FAIXA	JUN	JUL	AGO	SET	TOTAL
0-9	1	54	181	710	946
0-10	3	70	249	863	1185
Subestimativa(%)	66,7	22,9	27,3	17,7	20,2

Devido à mudança da faixa de níveis de cinza característicos das queimadas para 0 a 10 neste trabalho, enquanto em trabalhos anteriores esta faixa foi verificada como: a) do nível de saturação ao 9, para dados de 1987 (Setzer et al., 1988; Setzer e Pereira, 1991); e b) do nível de saturação ao 8 para dados de 1985 (Pereira, 1988), verifica-se a possibilidade de ocorrer a mudança da faixa de níveis de cinza das queimadas a cada dois anos. Portanto, é recomendável que nos trabalhos com queimadas se faça a análise radiométrica da banda 3 do AVHRR pelo menos uma vez no início do período de queimadas.

Entre as prováveis causas para esta mudança da faixa dos níveis de cinza das queimadas, podem-se citar:

- 1) A mudança do horário de cruzamento com o Equador do satélite operacional NOAA, que na época dos primeiros trabalhos era o NOAA-9, que passava por volta das 14:30h (ao lançamento), enquanto o satélite aqui empregado, o NOAA-11, tem o horário de cruzamento às 13:40h (ao lançamento). Isto causa mudanças nas condições de observação, principalmente no ângulo de incidência da radiação solar sobre os alvos, mudando a radiância recebida

pelo sensor AVHRR e podendo mudar os níveis de cinza característicos dos alvos.

- 2) O horário da passagem vespertina dos satélites NOAA muda com o tempo, tornando-se cada vez mais tardio, com um atraso em torno de 12 minutos no primeiro ano após o lançamento e cerca de 36 minutos no quarto ano (Price, 1991); este fato causa mudanças da mesma forma que na Seção anterior.
- 3) Como houve mudança de satélite, houve mudança na resposta espectral do sensor AVHRR a bordo do NOAA-11 com relação ao do NOAA-09, como pode ser observado em Kidwell (1991), podendo a resposta do sensor ser diferente em cada satélite, ou seja, mesmas radiâncias podem apresentar níveis de cinza diferentes nas imagens de cada satélite.
- 4) A calibração de pré-lançamento pode diferir do sensor AVHRR instalado no NOAA-9 para a do NOAA-11, fazendo com que a resposta do sensor seja diferente para cada satélite, da mesma forma que na Seção anterior.
- 5) Durante o lançamento e com o tempo de permanência no espaço o sensor pode sofrer desajustes, o que causa mudanças na calibração e faz com que mesmas radiâncias correspondam a níveis de cinza diferentes em imagens de épocas distintas obtidas a partir do mesmo satélite.

4.3.2.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL NAS BANDAS 1, 2 E 3

Na composição colorida utilizada para imagens AVHRR, ou seja, bandas 1, 2 e 3 nas cores vermelho, verde e azul, respectivamente, os alvos como queimadas

ativas, plumas de fumaça e nuvens aparecem conforme o descrito por Pereira (1988): queimadas aparecem com cores escuras; nuvens, com tonalidades do branco ao amarelo; e plumas de fumaça, do vermelho ao amarelo, mas nem sempre com forma alongada, podendo aparecer também com formas arredondadas. Já o solo exposto, não descrito anteriormente, aparece com tons amarelados (vide Figura 4.4 na Seção 4.3.1).

A vegetação ficou caracterizada com tonalidades entre o ciã e o laranja, diferindo do descrito por Pereira (1988), onde a vegetação aparece entre o verde e o ciã; esta diferença ocorre por serem trabalhos em tipos de vegetação diferentes, ou seja, floresta no caso de Pereira (1988), e cerrado (l.s.) neste trabalho, sendo que uma floresta reflete mais na banda 2, e emite menos (maior nível de cinza) na banda 3. No cerrado (l.s.), a variação de tonalidades acontece devido a diferenças na quantidade de biomassa e na cobertura do solo nos diferentes tipos fisionômicos; quando a vegetação é mais verde e densa, reflete pouco na banda 1 e muito na banda 2, e emite menos (maior nível de cinza) na banda 3, aparecendo com tonalidade ciã; quando a vegetação é menos verde, reflete mais na banda 1, tem valores intermediários na banda 2 e emite mais na banda 3 (nível de cinza mais baixo), mostrando tons alaranjados; em relação à vegetação menos verde, um solo exposto tem valores mais baixos na banda 2, aparecendo amarelado.

Na época seca, com a desidratação do estrato herbáceo, o componente solo tende a ser mais pronunciado nas unidades de vegetação parque de cerrado e campo, assim como nas pastagens; portanto, seus valores de níveis de cinza na banda 2 vão ser semelhantes aos do solo exposto, o que faz com que passem de tons alaranjados para tons

semelhantes aos do solo exposto (amarelado), podendo causar confusão espectral.

A banda 3 do AVHRR (Figura 4.8) apresentou, visualmente, um contraste marcante entre as áreas florestais verdes e densas, e as áreas do cerrado (l.s.). Conforme Pereira Jr. et al. (1989), as áreas de floresta têm temperaturas mais baixas; portanto, aparecem com níveis de cinza mais altos. Os cerrados são regiões mais quentes, aparecendo com níveis mais baixos, em face do menor grau de fitomassa e, concomitantemente, maior exposição do solo em relação a uma floresta; além disto, há uma maior variação de fitomassa entre os tipos do cerrado (l.s.), havendo então maior variação dos níveis de cinza. Outra observação é que na banda 3 os níveis de cinza da floresta são apenas inferiores aos de nuvens densas. As queimadas são semelhantes, visualmente, às áreas de solo exposto, mas conforme já comentado (Seção 4.3.2.1), as queimadas ativas apresentam os níveis mais baixos nesta banda (0 a 10), critério que permite uma separação visual em relação ao solo exposto, mas sem limites bem definidos. A Figura 4.9 apresenta as queimadas ativas classificadas (níveis de 0 a 10), permitindo comparação com outro alvos.

Nas bandas 1 e 2 as marca das queimadas apareceram com níveis de cinza baixos, mas próximos aos de áreas de solo exposto e aos tipos de vegetação do cerrado (l.s.) com menor fitomassa, não havendo contraste entre eles. Nestas bandas é possível, com dificuldade, observar um contraste entre áreas florestais verdes e densas e outros tipos de cobertura vegetal que ocupam a área. As bandas 1 e 2 propiciam a visualização de rios com mais de 500m de largura. Na banda 1 os rios aparecem com níveis mais altos em relação ao restante da imagem, principalmente no caso de rios com sedimentos em suspensão; na banda 2, eles aparecem com níveis mais baixos em relação ao restante

da imagem. Os rios e barragens nestas bandas são os pontos de controle mais fáceis de ser encontrados para fazer a navegação. A banda 1 pode ser visualizada na Figura 4.10.

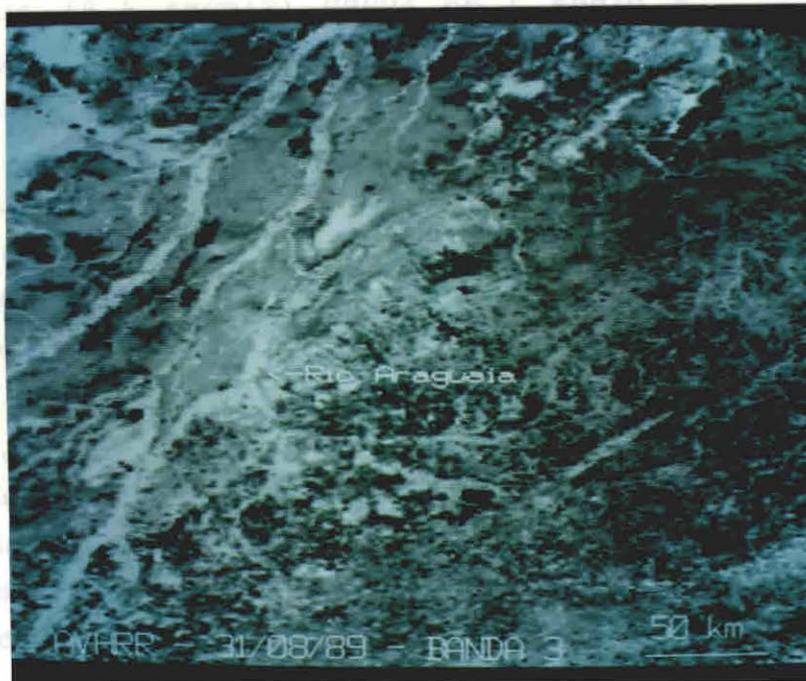


Fig. 4.8 - Banda 3 da imagem AVHRR de 31/09/89, na subárea.

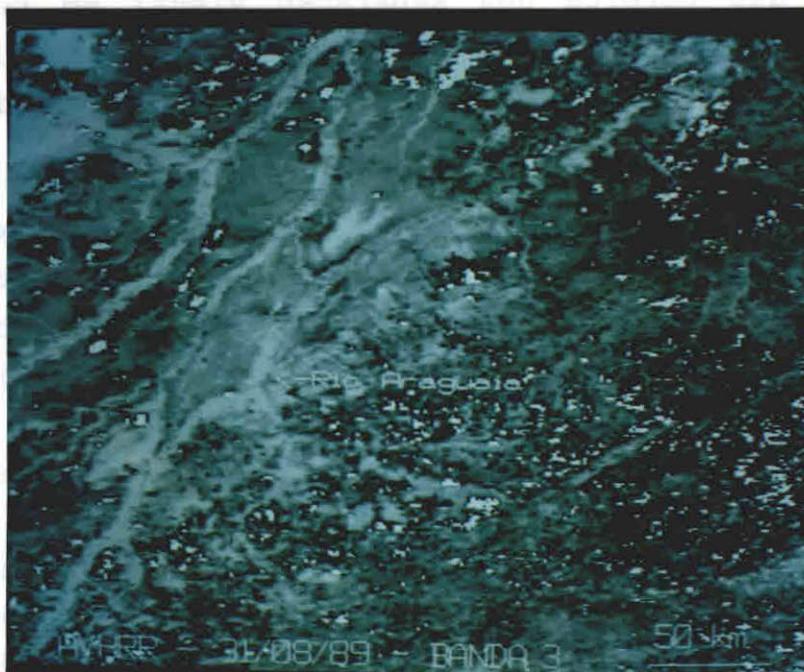


Fig. 4.9 - Banda 3 da imagem AVHRR de 31/09/89, na subárea, com as queimadas ativas classificadas.

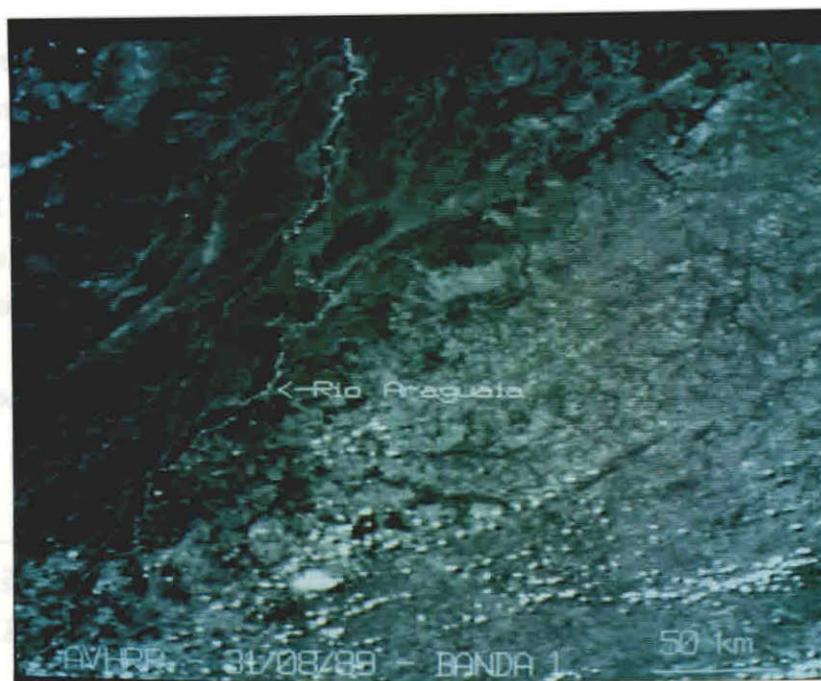


Fig. 4.10 - Banda 1 da imagem AVHRR de 31/09/89, na subárea.

Nas imagens AVHRR selecionadas, foi delimitada a subárea, onde foi feita a classificação das queimadas ativas na banda 3, com resolução total, através do método do fatiamento. Estabelecida a classe queimada, foram estimados seus parâmetros estatísticos nas bandas 1, 2 e 3; também para a subárea inteira, sem nenhuma classificação, foram estimados os parâmetros estatísticos dos "pixels" (Tabela 4.5). Deve ser observado que a faixa de variação dos níveis de cinza é de 0 a 255, o que totaliza 256 níveis.

Os dados de médias para a classificação das queimadas ativas estão dentro do intervalo de confiança calculado por Pereira (1988), apesar de os dados aqui apresentados se referirem a uma subárea na região dos cerrados, com tipo de vegetação distinto da área florestal na Amazônia, onde foi realizado o outro trabalho. Conforme

já comentado na Seção anterior, na banda 3 as queimadas são caracterizadas na faixa de níveis de cinza de 0 a 10, apresentando um comportamento distinto dos demais alvos; isto pode ser observado também na Figura 4.11, onde é apresentado o histograma de frequência dos níveis de cinza da subárea nas bandas 1, 2 e 3. Pode ser observado que entre a classificação com os níveis de 0 a 9 e de 0 a 10 não há diferenças além do óbvio aumento da média e do número de "pixels" classificados como queimadas.

TABELA 4.5 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS NÍVEIS DE CINZA DOS "PIXELS" DE QUEIMADAS E DA SUBÁREA NAS BANDAS 1, 2 E 3 DE IMAGENS AVHRR/NOAA, NA ESTAÇÃO SECA DE 1989

	BANDA	14/06				10/07				11/06				08/09			
		média	desvio	var.	apliit.	média	desvio	var.	apliit.	média	desvio	var.	apliit.	média	desvio	var.	apliit.
QUEIMADAS 0 a 7	Banda 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Banda 2	35,0	-	35-35	...	33,2	3,0	23-40	17	30,6	5,3	22-46	29	32,3	6,4	23-70	67
	Banda 3	9,3	-	9-9	0	4,9	2,3	0-9	9	4,6	3,4	0-9	9	4,6	3,2	0-9	9
			(n = 1)				(n = 54)				(n = 181)				(n = 710)		
QUEIMADAS 0 a 10	Banda 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Banda 2	35,3	18,1	35-77	44	32,7	2,9	23-40	17	31,0	5,3	20-49	29	35,7	7,2	22-56	64
	Banda 3	9,7	0,5	9-10	1	6,1	3,2	0-10	10	6,1	3,3	0-10	10	5,5	3,6	0-10	10
			(n = 3)				(n = 70)				(n = 247)				(n = 863)		
SUB-ÁREA	Banda 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Banda 2	45,1	19,9	15-109	154	33,7	3,0	12-68	76	39,7	16,3	19-101	173	52,0	23,7	17-232	215
	Banda 3	131,1	22,3	9-210	285	100,4	19,8	0-229	229	91,3	24,2	0-209	209	83,7	29,9	0-239	239
			(n = 90000)				(n = 90000)				(n = 90000)				(n = 90000)		
MATRIZ COVARIÂNCIA QUEIMADAS	Banda 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Banda 2	...	-	-	...	...	9,1	...	...	...	33,0	...	...	...	41,6	54,2	...
	Banda 3	...	-	-	...	...	1,5	8,1	...	...	1,4	11,7	...	...	2,4	3,9	10,4
MATRIZ COVARIÂNCIA SUB-ÁREA	Banda 1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Banda 2	...	395,2	...	...	...	6,7	...	...	...	262,6	...	...	...	1767,5	649,7	561,0
	Banda 3	...	215,2	517,8	...	...	15,7	392,6	...	...	122,1	523,6	...	...	275,3	255,4	895,4
		n = número de pixels da amostra				desvio = desvio padrão											
		... = banda ausente na imagem				var. = variação dos níveis											
		- = número de pixels não representativo				apliit. = amplitude dos níveis											

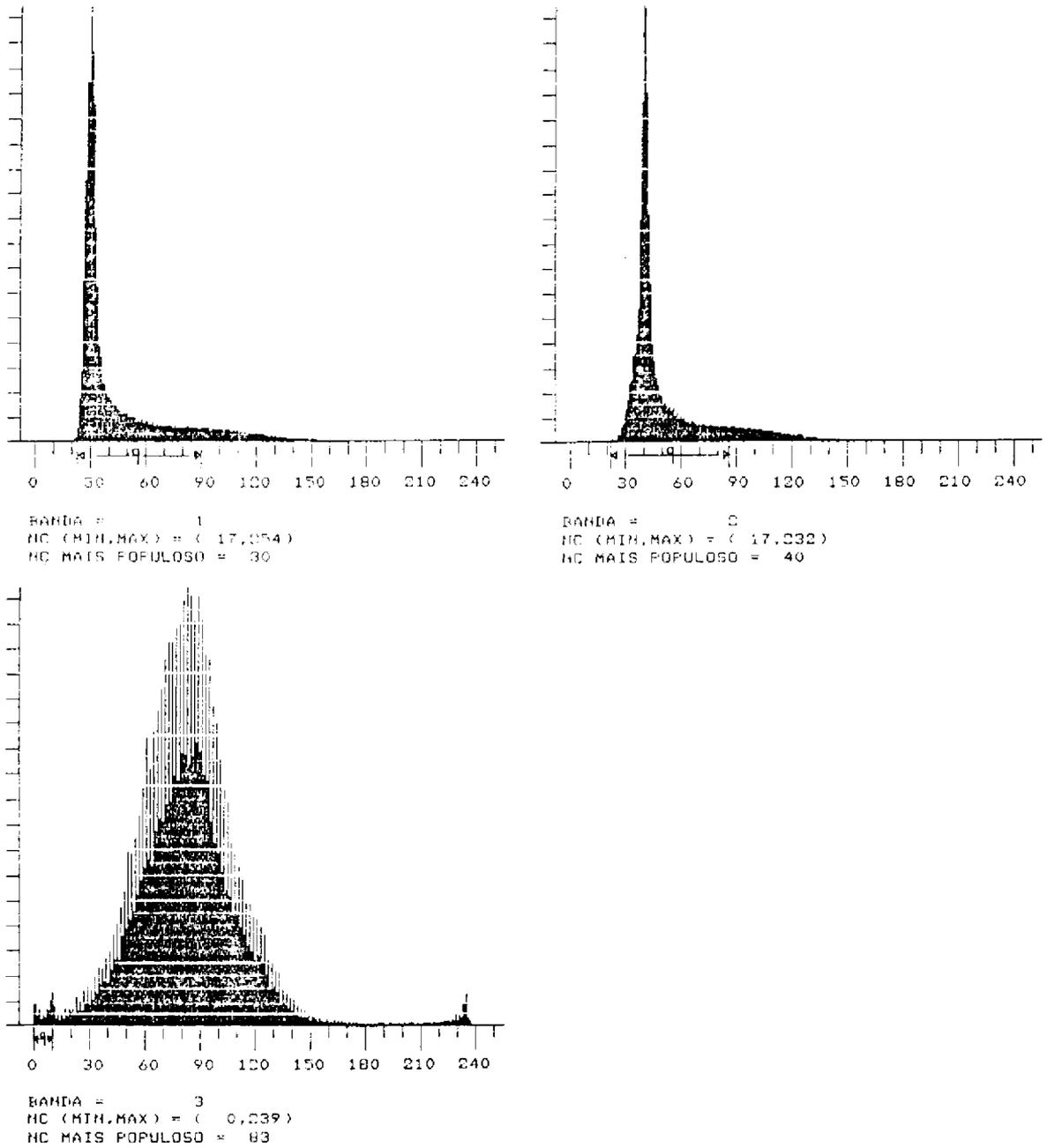


Fig 4.11 - Histograma dos níveis de cinza da subárea, para as bandas 1, 2 e 3 da imagem de 08/09/89 do AVHRR/NOAA (q = queimada).

Na Tabela 4.5, pelo desvio padrão e pela amplitude, observou-se que as queimadas nas bandas 1 e 2 ocupam uma faixa de níveis de cinza maior que na banda 3. Por exemplo, no dia 08/09, a faixa dos valores dos "pixels" de queimadas em relação à amplitude total da banda é de 28,3% e 29,8% para as bandas 1 e 2, respectivamente, enquanto na 3 é de 4,2%. Calculando o número de "pixels" associado a cada faixa para queimadas (níveis de 23 a 90 para banda 1, e de 22 a 86 para a 2), verifica-se que a faixa da banda 1 tem 80.513 "pixels", que representam 89,5% do número total existente na subárea, enquanto na 2 a faixa tem 80.107, que representam 89,0% do total. Ocupando faixas com um número tão grande de "pixels", e observando que na Figura 4.11 não existe nenhuma curva associada a queimadas nas bandas 1 e 2, é certo que há confusão espectral com outros alvos, não havendo portanto uma boa caracterização das queimadas nestas bandas.

Observando a Tabela 4.5, nos dados da subárea, nota-se que uma causa para a dificuldade em caracterizar as queimadas nas bandas 1 e 2 é que, apesar da boa amplitude, estas bandas têm uma concentração no número de "pixels" nos níveis de cinza mais baixos, como pode ser observado pelos valores de média, desvio padrão, e também na Figura 4.11. Assim, não há uma distribuição sobre toda a faixa de níveis destas bandas, o que faz com que os alvos estejam distribuídos sobre faixa estreita, causando confusões. Enquanto isto, na banda 3 tem-se uma média mais próxima do valor central dos níveis e um desvio padrão maior que nas outras bandas, o que faz com que os níveis tenham melhor distribuição sobre a faixa existente na banda. Na Figura 4.11 pode-se observar esta melhor distribuição, bem como a existência de três faixas distintas de níveis da banda 3: duas nos valores extremos, com uma caracterizando as queimadas (níveis mais baixos), e outra, nuvens frias (níveis mais altos); e uma faixa

central, com distribuição aproximadamente normal, representando demais alvos que, por estarem melhor distribuídos sobre a faixa de níveis, podem ter pouca confusão entre eles.

Na Tabela 4.5 também são apresentadas as matrizes de covariância das 3 bandas tanto para a imagem da subárea quanto para a classe queimada na subárea. Na matriz, na diagonal estão as variâncias das bandas, e os demais dados são a covariância entre as bandas (que pode ser negativa ou positiva); uma covariância com valores absolutos, próximos da variância das bandas, indica alta dependência estatística, enquanto valores próximos a zero indicam baixa dependência. Analisando as matrizes, é observada uma dependência positiva quase total entre as bandas 1 e 2, tanto para a classificação das queimadas, como para a subárea em geral; isto quer dizer que estas bandas contêm informações relativamente parecidas. Por exemplo, fazendo a classificação de uma classe qualquer em uma das duas bandas, será encontrado resultado parecido ao obtido quando é feita a mesma classificação na outra banda. Também pode-se afirmar que, ao fazer uma classificação utilizando essas duas bandas em conjunto (inclusive ao utilizar três ou mais bandas), o resultado será essencialmente o mesmo que ao utilizar apenas a banda 1 ou a banda 2.

A banda 3 apresenta valores intermediários de dependência linear para a subárea, tanto com a banda 1 como com a 2. Isto indica que as informações desta banda são diferentes das outras duas; portanto, uma classificação da banda 3 com a banda 1 ou 2 pode ser mais válida do que utilizando apenas a banda 3. Por outro lado, a característica de queimadas na banda 3 é tão definida que o uso complementar de outra banda na classificação é dispensável.

4.3.3 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DAS QUEIMADAS EM IMAGEM TM/LANDSAT

A composição colorida formada com as bandas 3, 4 e 5 do TM, nas cores azul, verde e vermelho respectivamente (Figura 4.5), mostrou que as marcas das queimadas aparecem com baixos níveis de cinza, o que está de acordo com Deshler (1974), Santos e Aoki (1981), Ponzoni et al. (1986) e Pereira (1988). À medida que aumenta o tempo entre a passagem do satélite e a data da queimada, começa a ocorrer reflexão nas bandas 3 e 5, e os vestígios das queimadas adquirem tonalidade magenta, fato já notado por Pereira (1988) para áreas de floresta. Uma área queimada, logo após a ocorrência do incêndio, está coberta de cinzas escuras; mas, com o passar do tempo, com a ação do vento e das chuvas, o sinal da queimada tende a desaparecer, fazendo com que aumente a exposição do solo, aumentando sua contribuição na reflexão da radiação solar nas bandas 3 e 5; assim, áreas queimadas há algum tempo podem ser confundidas com áreas de solo exposto, que também apresentam tonalidade magenta por ter baixa reflexão na banda 4.

A vegetação da região dos cerrados aparece com cores de verde a ciã, dependendo da quantidade de fitomassa da unidade de vegetação. Uma área com vegetação de maior fitomassa, como uma área de tensão ecológica entre cerrado e floresta estacional, reflete muito na banda 4 e pouco nas demais, aparecendo verde na imagem, enquanto em uma área com vegetação de menor fitomassa, como parque de cerrado, ocorre também reflexão na banda 3, aparecendo com cor ciã. Conforme Ponzoni et al. (1986), durante a estação seca a vegetação dos cerrados torna-se menos vigorosa, o que impede a distinção entre os tipos de vegetação. Portanto, áreas de campo-cerrado, parque de cerrado e campo, assim como áreas de pastagens implantadas, onde o

estrato herbáceo é dominante e no qual as folhas ficam dissecadas neste período, tem uma diminuição da cobertura vegetal e conseqüente aumento de exposição do solo, podendo aparecer com tonalidade magenta, causando confusão com solo exposto e queimadas.

É importante observar que nos cerrados, após a ocorrência de precipitação, áreas queimadas têm rebrota do estrato herbáceo muito mais intensa e rápida que áreas não afetadas por queimadas. Nestes casos, a identificação das áreas queimadas torna-se mais difícil com o decorrer do tempo. Ponzoni et al. (1986) puderam observar a rebrota em cerrado (l.s.) cerca de dois meses após a ocorrência de uma queimada.

Antes da classificação, um primeiro teste na imagem revelou a variação dos níveis de cinza de alvos que poderiam causar confusão na classificação das queimadas, conforme é apresentado na Figura 4.12 (os níveis podem variar de 0 a 255).

Pode-se observar que a banda 4 apresenta melhor contraste entre os alvos, inclusive para queimadas; a maior confusão acontece entre solo exposto e tipos de cerrado de menor fitomassa, por motivos já comentados. A banda 5 apresenta boa caracterização da água e solo exposto, mas confusão de vegetação com queimadas. E a banda 3 apresenta muita confusão entre os alvos em geral.

Conforme a metodologia, foi utilizado o método do paralelepípedo para a classificação das queimadas. Em sucessivos testes com diferentes áreas de treinamentos, em toda imagem TM de 11/09/89 foram encontrados os limites dos níveis de cinza utilizados para a classificação das queimadas. São eles: banda 3 de 28 a 40; banda 4 de 18 a 34; e banda 5 de 49 a 99.

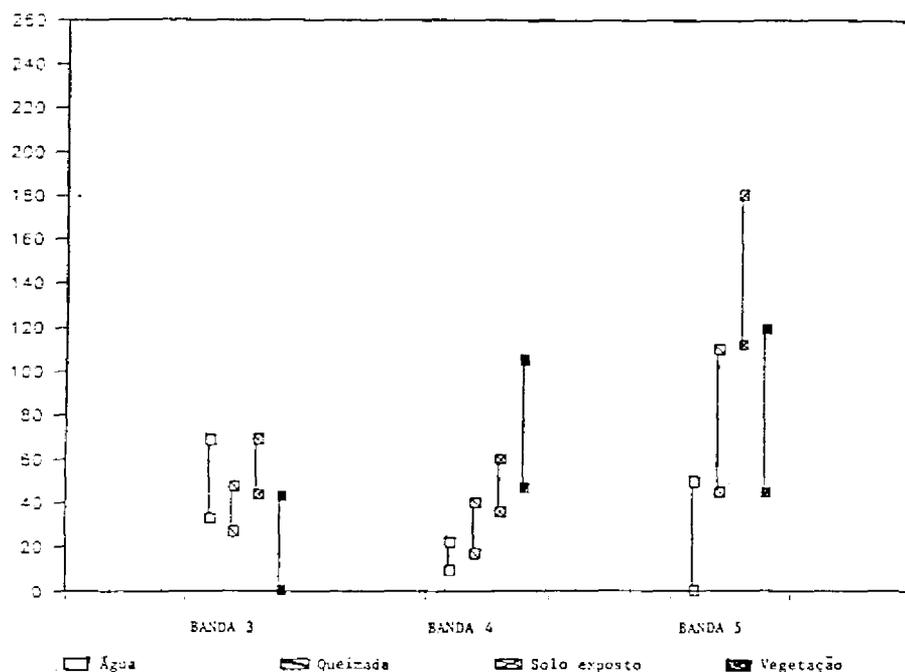


Fig. 4.12 - Variação dos níveis de cinza para queimada, água, solo exposto e vegetação, para as bandas 3, 4 e 5 na imagem TM/Landsat de 11/09/89.

O limite inferior de nível de cinza para a banda 4 foi selecionado para evitar confusão com água, e o limite superior para evitar confusão com solo exposto. Para a banda 5, os limites, além de selecionados para evitar as mesmas confusões da banda 4, visaram diminuir a confusão com a vegetação. E para a banda 3, os limites procuraram diminuir a confusão com a vegetação; além disto, o superior procurou diminuir a confusão com água e solo exposto.

Conforme já comentado, pode haver confusão entre áreas de determinadas queimadas com solo exposto e áreas de vegetação com o estrato herbáceo dominante. Como a classificação evitou a confusão com solo exposto e áreas de vegetação, determinadas queimadas podem não ter sido classificadas. Uma área onde o estrato herbáceo é dominante e com pouca cobertura do solo, áreas de culturas com restos agrícolas e áreas de pastagem artificial, que aparecem com tonalidades magentas na imagem TM da passagem anterior,

podem ter sido queimadas e, pela ação do vento e de chuvas, ter seus sinais atenuados, aparecendo na imagem posterior também com tons magentas. Devido a isto, a classificação não foi esclarecedora para estes casos, não permitindo determinar se uma queimada havia ocorrido entre o período das duas imagens TM selecionadas, ou se sua ocorrência era anterior à data da imagem TM mais antiga (26/08/89), pois em ambas as imagens tinham comportamento semelhante. Portanto, esta limitação pode também ter resultado em verdade terrestre não-exata para a verificação da detecção de queimadas pelo AVHRR na área de controle. A classificação das queimadas pode ser vista na Figura 4.13.

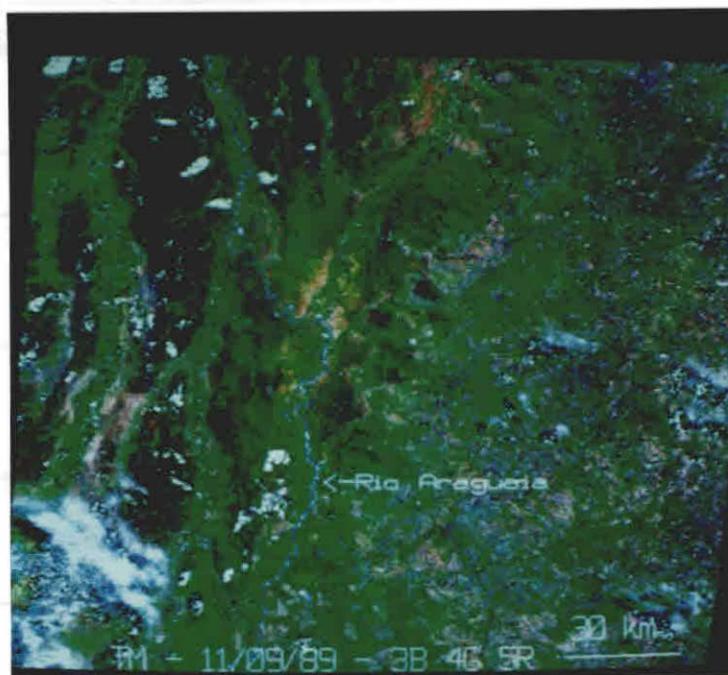


Fig. 4.13 - Classificação das áreas queimadas na imagem TM/Landsat, órbita/ponto 223/69, de 11/09/89, na área de controle.

A classificação das áreas queimadas forneceu os parâmetros estatísticos das queimadas nas bandas 3, 4 e 5 da imagem TM/Landsat de 11/09/89, conforme a Tabela 4.6; também foram extraídos parâmetros para a imagem inteira,

sem classificação, sendo a variação dos níveis de cinza na imagem de 0 a 255.

Os valores da faixa de níveis de cinza das queimadas abrangeram os valores das médias obtidas por Ponzoni et al. (1986) em área de cerrado, apesar de os estudos serem em anos e meses diferentes; também os valores para áreas queimadas encontrados por Pereira (1988) na Floresta Amazônica estão dentro da faixa de níveis; neste caso, além do ano e mês diferente, a área de estudo foi em região de vegetação diferente.

TABELA 4.6 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS NÍVEIS DE CINZA DA CLASSE QUEIMADA E DA IMAGEM INTEIRA NAS BANDAS 3, 4 E 5 DA IMAGEM TM/LANDSAT DE 11/09/89

		MÉDIA	DESVIO	FAIXA	AMPLITUDE
QUEIMADAS	Banda 3	34,8	2,8	28-40	12
	Banda 4	29,8	3,3	18-31	15
	Banda 5	75,8	12,9	49-99	50
IMAGEM	Banda 3	40,2	14,1	19-255	236
	Banda 4	55,9	13,1	9-218	209
	Banda 5	97,7	27,4	0-255	255
MATRIZ DE COVARIÂNCIA QUEIMADAS	Banda 3	7,57			
	Banda 4	4,12	11,19		
	Banda 5	18,96	13,55	167,26	
MATRIZ DE COVARIÂNCIA IMAGEM	Banda 3	198,36			
	Banda 4	46,38	170,62		
	Banda 5	289,23	40,08	752,52	

Pela Tabela é observado que a classificação das áreas queimadas apresenta maior variação na banda 4 que na banda 3. Na Figura 4.14 nota-se que, logo após a curva característica do alvo água, a classe queimada ocupa uma faixa na borda da curva normal da banda 4, apresentando um número pequeno de "pixels" em relação ao número total da

imagem, diminuindo a confusão com outros alvos. O gráfico da banda 3 mostra que, apesar da maior variação existente na banda, seus níveis de cinza aparecem concentrados nos valores mais baixos; esta concentração faz com que uma faixa mais estreita de níveis de cinza englobe maior número de "pixels", o que leva a uma confusão entre alvos, inclusive queimadas. A menor variação na classe de queimadas resulta do fato de ela estar localizada nesta mesma faixa estreita.

Pela Tabela 4.6 e pela Figura 4.14, é observado que banda 5 tem a maior variação na distribuição dos níveis de cinza sobre a curva; entretanto, a característica do alvo vegetação, que está distribuído sobre larga faixa de níveis nesta banda, faz com que exista confusão entre este alvo e os demais, inclusive com as queimadas.

Os valores de covariâncias mostram, para a imagem, uma dependência linear regular entre as bandas 3 e 5, o que indica que a informação nestas bandas pode ser semelhante; portanto, o uso destas bandas em conjunto pode não acrescentar informação significativa em relação ao uso de cada uma em separado. A banda 4, ao contrário, apresenta baixa dependência linear com as bandas 3 e 5; portanto uma classificação com a banda 4 e a banda 3 ou 5 deve acrescentar informação ao uso de qualquer uma destas bandas isoladamente. É observado que, para a classificação das áreas queimadas, os valores de covariância indicam valores intermediários para todas as combinações de bandas; assim, pode ocorrer um acréscimo de informação na classificação quando são utilizadas as 3 bandas em conjunto, ao contrário de uma isoladamente, ou uma combinação de duas bandas. Além disto, como a imagem TM/Landsat é considerada verdade terrestre, foram utilizadas as 3 bandas para encontrar a classificação mais exata possível.

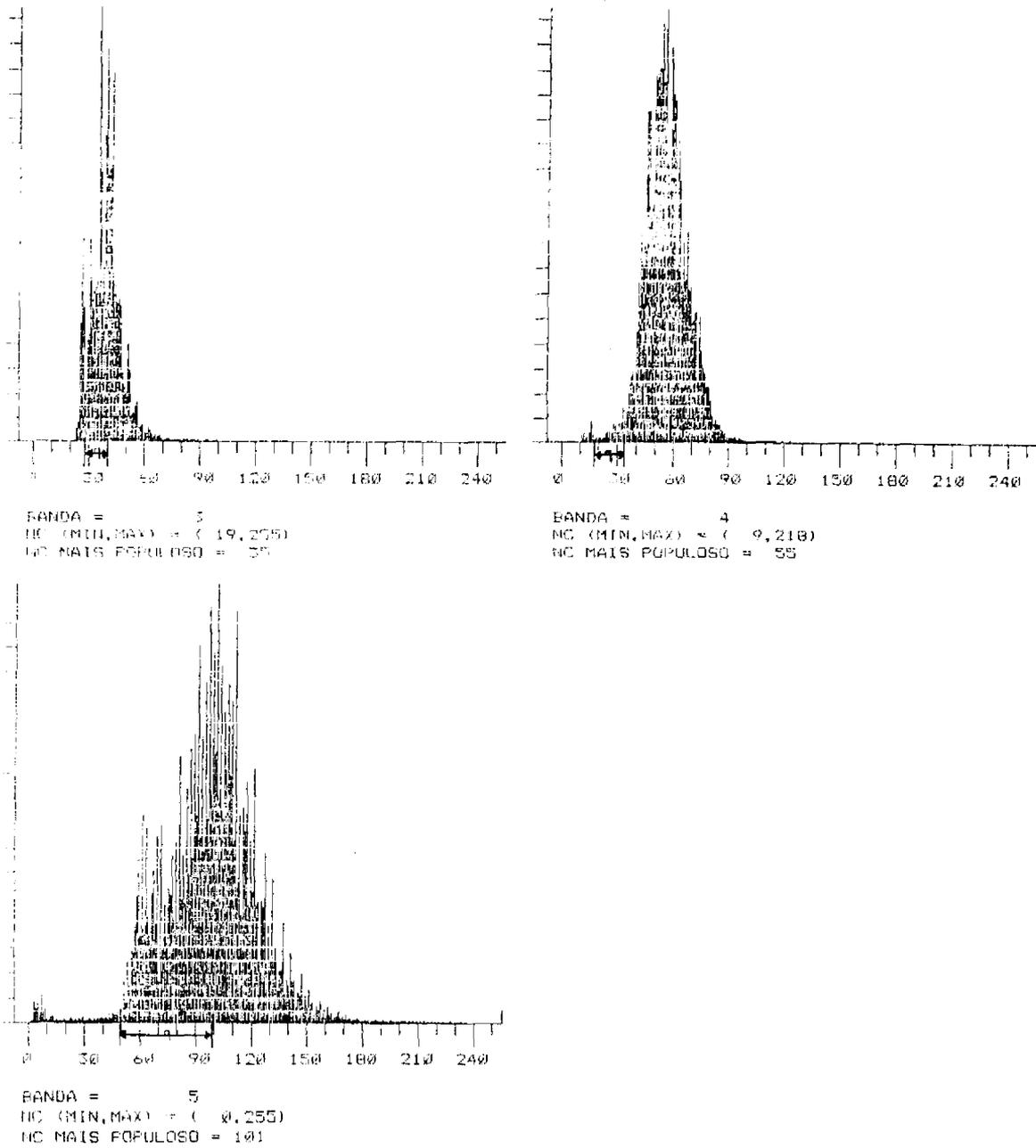


Fig. 4.14 - Histograma dos níveis de cinza para as bandas 3, 4 e 5 da imagem TM/Landsat de 11/09/89 (q = queimada).

4.3.4 - COMPARAÇÃO ENTRE ÁREAS QUEIMADAS CLASSIFICADAS EM IMAGENS AVHRR/NOAA E TM/LANDSAT

A Tabela 4.7 apresenta os dados de área da classificação das queimadas ativas nas imagens AVHRR/NOAA e de marcas das queimadas na TM/Landsat, assim como a informação da continuidade das queimadas e da unidade principal de vegetação em que ocorreu a queimada. A partir destes dados, foi estimada a equação de regressão linear que relaciona a classificação das queimadas no AVHRR com a classificação do TM. A comparação foi feita para a classificação das queimadas no AVHRR tanto com os níveis de cinza de 0 a 9 da banda 3 como para os níveis de 0 a 10. Isto porque o programa de classificação de queimadas disponível na época do processamento das imagens AVHRR utilizava o fatiamento de 0 a 9, empregado então na correção da estimativa de área queimada do AVHRR. Como foi visto anteriormente, foi observada a mudança para a fatia de 0 a 10, motivo pelo qual foi também gerada uma equação para esta faixa com vistas em seu uso em outros trabalhos.

Um exame dos dados para a análise de regressão mostrou dois pontos anômalos: o da queimada 36 e o da 50. Uma avaliação visual da imagem indicou que, para estes pontos, a classificação não mostrou adequadamente a extensão da queimada. Na queimada 36 havia uma área de cor preta circundada por uma área de cor magenta mais extensa, tendo o classificador TM desprezado esta última, enquanto que o AVHRR classificou como queimada. No caso da queimada 50, notou-se a proximidade de corpos de água, o que fez com que o classificador aumentasse erroneamente a área queimada por confusão.

TABELA 4.7 - ÁREAS QUEIMADAS CLASSIFICADAS NO AVHRR E NO TM

QUEIMADA identific.)	AREA TM (km ²)	AREA AVHRR NC: 0-10 (km ²)	NC: 0-9 (km ²)	CONTINUIDADE DE DETECCAO (dias)	UNIDADE VEGETACAO
1	nd	1.2	1.2		
2	nd	2.4	2.4		
3	nd	2.4	2.4		
4	nd	2.4	1.2		
5	nd	3.6	1.2		
6	nd	3.6	2.4		
7	nd	6.0	6.0		
8	nd	7.2	6.0		
9	nd	12.0	9.6		
10	0.011	1.2	1.2	1	ta
11	0.017	22.8	22.8	4	ca
12	0.016	3.6	3.6	1	ta
13	0.039	2.4	2.4	1	ta
14	0.113	6.0	6.0		pc
15	3.149	2.4	1.2	1	ca
16	0.224	9.6	9.6	3	ca
17	0.275	1.2	1.2	1	pc
18	0.223	2.4	2.4	2	ta
19	0.329	7.2	6.0	5	ta
20	0.371	3.6	2.4	1	ta
21	0.390	0.0	0.0		ta
22	0.417	0.0	0.0		pc
23	0.527	0.0	0.0		pc
24	0.533	2.4	2.4	2	pc
25	0.634	2.4	1.2	1	pc
26	0.639	2.4	2.4	1	pc
27	0.817	13.2	13.2	3	cc
28	0.845	7.2	4.8	2	pc
29	0.948	0.0	0.0		pc
30	0.951	0.0	0.0		pc
31	0.962	0.0	0.0		pc
32	1.378	0.0	0.0		pc
33	1.415	4.8	4.8	3	pc
34	1.553	2.4	2.4	1	ta
35	2.093	0.0	0.0		pc
36	2.363	94.8	85.2		pc
37	2.426	2.4	2.4	1	cc
38	2.555	3.6	2.4	2	cc
39	3.055	0.0	0.0		pc
40	4.230	21.2	28.8	4	pc
41	4.883	9.6	6.0	5	pc
42	5.105	0.0	0.0		pc
43	5.297	8.4	3.6	3	pc
44	5.384	21.6	19.2	4	cc
45	7.020	42.0	37.2	4	pc
46	7.850	28.8	18.0	5	ta
47	9.959	13.2	10.8	2	pc
48	10.548	3.6	3.6	1	pc
49	12.142	14.4	13.2	6	pc
50	14.306	0.0	0.0		cc
51	15.368	19.2	6.0	1	pc
52	17.672	62.4	60.0	7	cc
53	24.594	78.0	69.6	4	pc

cc = campo cerrado
pc = parque de cerrado
ca = cerrado com antropismo
ta = area de tensao ecologica com antropismo
nd = nao detectada

A Tabela mostra alguns resultados de particular interesse. O primeiro é que o tamanho médio das queimadas detectadas na imagem TM é $3,668\text{km}^2$ (desvio padrão de $1,743$), com variação de $0,011\text{km}^2$ a $24,594\text{km}^2$; $69,0\%$ das queimadas têm área menor que a média, e $88,1\%$ tem área até 10km^2 . Em segundo lugar foram registrados 15 casos, ou seja $35,7\%$, onde a queimada detectada pelo AVHRR tinha a área medida pelo TM menor que a área nominal do "pixel" AVHRR ($1,2\text{km}^2$); a área da menor queimada detectada foi de $0,011\text{km}^2$, correspondente a $0,9\%$ do tamanho do "pixel". Esta queimada foi detectada numa área de tensão ecológica com antropismo, havendo uma cobertura florestal densa em volta da queimada, com baixa temperatura na imagem AVHRR, estabelecendo assim um contraste forte com a área queimada de elevada temperatura. Estes dados confirmam o observado por diversos autores, como Robinson (1991), da possibilidade de detecção de queimadas menores que o tamanho do "pixel" AVHRR.

A observação visual das queimadas mostra que são interrompidas por rios, estradas, áreas de solo exposto, e áreas queimadas anteriormente, resultado que concorda com Gillon (1983).

Com relação à unidade de vegetação onde ocorreram as queimadas, $59,5\%$ delas ocorreram em parque de cerrado; $21,4\%$, em área de tensão ecológica com antropismo; $11,9\%$, em área de campo-cerrado; e $7,2\%$, em cerrados com antropismo.

Foram encontrados 11 casos de áreas queimadas localizadas pelo TM não detectadas pelo AVHRR, ou seja, $26,2\%$ de abstenção em relação ao número de queimadas detectadas pelo TM, tendo 10 dos casos ocorridos na unidade de vegetação parque de cerrado. Os casos de abstenção podem ser explicados pela visão instantânea da banda 3 do AVHRR,

a qual permite a detecção de queimadas ativas apenas no momento da passagem do satélite, mas pode não detectar queimadas fora deste horário. Também a ocorrência de nuvens densas pode ter impedido a detecção; observando as imagens AVHRR, das 14 datas do período de controle, 3 estavam sem nuvens sobre a área de controle (30/08, 31/08 e 01/09); 3 estavam com nuvens em alguma região (07/09, 08/09 e 10/09); e o restante apresentava nuvens em pelo menos metade da área. Considerando que a maior parte dos casos ocorreram em um tipo de vegetação, parque de cerrado, com baixa quantidade de fitomassa combustível, e que a temperatura da queimada é função principalmente da quantidade de material combustível, outra causa para a omissão pode ter sido que a temperatura alcançada pela queimada não fosse alta o suficiente para estar entre os níveis de cinza de 0 a 10 da imagem AVHRR.

A continuidade das queimadas foi dada em dias, visto que um dia é unidade de tempo entre uma passagem e a seguinte do satélite NOAA. A continuidade de detecção na área de controle variou de 1 a 7 dias, com média de 2,6 dias (desvio padrão de 1,7), tendo 54,8% das queimadas continuidade menor que a média. Foi verificado se havia uma relação linear entre a continuidade e o tamanho da queimada, tendo sido encontrado um coeficiente de correlação de 0,45 e de determinação de 0,21. Isto indica que há pouca dependência linear entre a continuidade das queimadas e sua área, e que em apenas 21% dos casos a continuidade e o tamanho das queimadas estão relacionados. Esta baixa correlação pode ser explicada pelos vários fatores envolvidos na dispersão e duração de uma queimada, conforme citado na Seção 2.2.2, como quantidade e umidade do material combustível e condições meteorológicas (temperatura, umidade e ventos).

Uma ressalva quanto à duração das queimadas é que pode ter ocorrido na classificação AVHRR uma confusão entre queimadas ativas e áreas onde já haviam ocorrido queimadas. Por exemplo, a queimada de número 11 na Tabela 4.7 tem uma área média queimada por dia de 5700m^2 , que é um valor muito pequeno para uma queimada que se prolongou por 3 dias no mínimo.

Foram encontrados 9 casos (20,5%) na classificação de queimadas no AVHRR em que não havia correspondência com queimadas classificadas no TM; todos os casos foram em unidades de vegetação com antropismo, portanto de baixa fitomassa. Uma explicação pode ser a confusão na classificação da imagem AVHRR entre queimadas ativas e áreas já queimadas no período de controle, conforme já comentado, ou com solo exposto de áreas de culturas ou de áreas queimadas anteriores ao período de controle. Mas conforme já citado na Seção 4.3.3, a classificação e comparação de imagens TM não foi esclarecedora para determinar se algumas queimadas haviam ocorrido antes ou depois do período de controle, o que impediu de determinar precisamente se a detecção no AVHRR era de queimada ou de solo exposto. A ocorrência de nuvens no dia 10/09 sobre a região da imagem em que ocorreram 8 casos (ocorridos de 02/09 a 10/09) indica a possibilidade de chuvas, podendo fazer com que o sinal da queimada tenha sido atenuado, não permitindo a detecção na imagem TM destas queimadas ocorridas no período de controle.

Utilizando o modelo de regressão linear e considerando a área estimada pelo TM como verdade terrestre, portanto como variável independente, e a área estimada de pelo AVHRR como variável dependente, foram estimados os parâmetros da regressão. Para a classificação das queimadas no AVHRR com os níveis de cinza de 0 a 9 da banda 3, obtêm-se os seguintes dados:

- 1) Coeficiente de correlação de 0,75.

Este coeficiente varia de 0, quando não há relação linear entre as variáveis, até 1, quando ocorre relação linear total. Portanto, o valor do coeficiente indica que pode existir uma dependência linear entre as variáveis.

- 2) Coeficiente de determinação (R^2) de 0,56.

Este coeficiente indica que 56% das variações encontradas na área AVHRR (variável dependente) podem ser explicadas pelo modelo linear, com relação à área TM (variável independente).

Este valor baixo pode ser em função da reduzida (1,1km) e variável resolução espacial do sensor AVHRR com relação à do sensor TM (30m), o que faz com a exatidão das medidas de áreas queimadas seja menor para o AVHRR; além disto, o AVHRR detecta queimadas de tamanho menor que a resolução do seu "pixel", e a visão instantânea que este sensor têm das queimadas diminui a exatidão da medida. O fato de a classificação das áreas queimadas no TM não abranger ou não avaliar com exatidão áreas queimadas que tiveram seu sinal atenuado, conforme já comentado na Seção 4.3.3, assim como a possível confusão da classificação das queimadas no AVHRR com solo exposto, pode causar uma diminuição na exatidão da medida do TM, levando a diminuir o R^2 .

- 3) Valor do teste F de 63,10.

Significativo ao nível de 1% de probabilidade, indica que se deve testar o modelo $Y = a + bX$ para a regressão.

- 4) Há erro padrão da estimativa de 9,33.

- 5) Os coeficientes estimados para o modelo linear $Y = a + bX$ geraram a seguinte equação:
 $\text{área_AVHRR} = 1,6256 + 2,0403 \times \text{área_TM}$.

O gráfico desta equação encontra-se na Figura 4.15, juntamente com o intervalo de confiança (linhas internas) e o intervalo de previsão (linhas externas). Na Figura 4.16 são mostrados os resíduos em função da área TM; neste gráfico têm-se 23 resíduos positivos e 28 negativos, que mostram uma distribuição aleatória quanto aos sinais. Note-se que, para valores acima da área queimada média ($3,668\text{km}^2$), existe a tendência de aumento dos valores dos resíduos, o que indica uma falta de ajustamento do modelo para estes valores; felizmente estes valores são mais difíceis de ocorrer, pois, como foi visto, 69% das queimadas apresentaram área inferior a média.

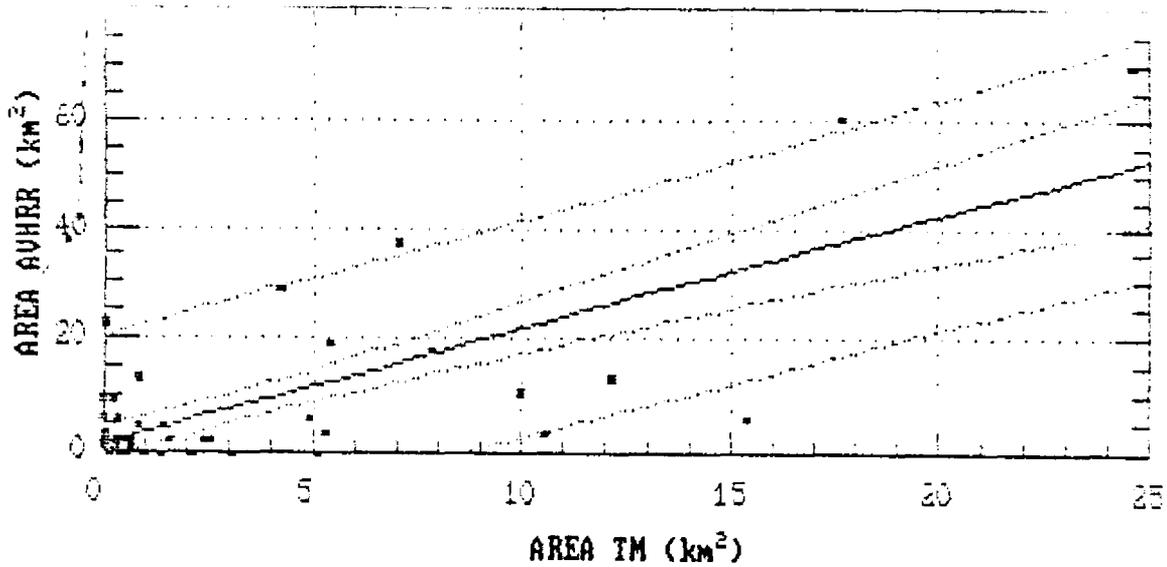


Fig. 4.15 - Reta da regressão linear calculada entre áreas queimadas estimadas pelo TM e AVHRR (níveis de 0 a 9).

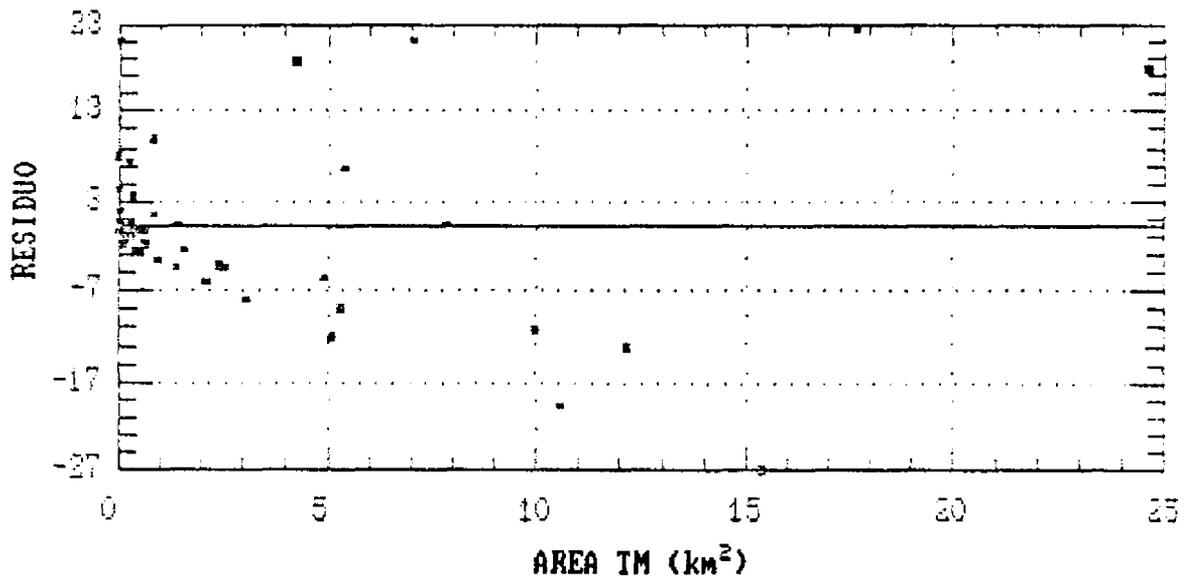


Fig. 4.16 - Resíduos estimados a partir da equação de regressão linear calculada entre áreas queimadas no TM e AVHRR (níveis de 0 a 9).

Para a classificação das áreas queimadas no AVHRR com os níveis de 0 a 10, têm-se os seguintes dados:

- 1) Coeficiente de correlação 0,80.
Este valor sugere a presença de dependência linear entre as variáveis.
- 2) Coeficiente de determinação (R^2) = 0,63.
Este valor mostra que 63% das variações da área do AVHRR podem ser explicadas pelo modelo linear.
- 3) $F = 85,12$.
Significativo ao nível de 1% de probabilidade, indica que se deve testar o modelo $Y = a+bX$.
- 4) Erro padrão da estimativa 9,41.
- 5) Os coeficientes estimados para o modelo linear geraram a seguinte equação:
$$\text{área_AVHRR} = 2,0072 + 2,3891 \times \text{área_TM}.$$

A reta da equação é mostrada na Figura 4.17, e os resíduos estimados na Figura 4.18. Existem 22 resíduos positivos e 29 negativos, dado este que mostra a aleatoriedade da distribuição dos sinais. Como no caso anterior, também aqui se observa uma tendência de aumento dos valores dos resíduos para áreas acima da média, o que indica uma falta de ajuste do modelo a estas áreas.

Pelos valores estimados, a classificação das queimadas pelo método do fatiamento com os níveis de cinza de 0 a 10 da banda 3 do AVHRR é superior à que utiliza os níveis de 0 a 9, o que mostra uma melhor estimativa de áreas queimadas.

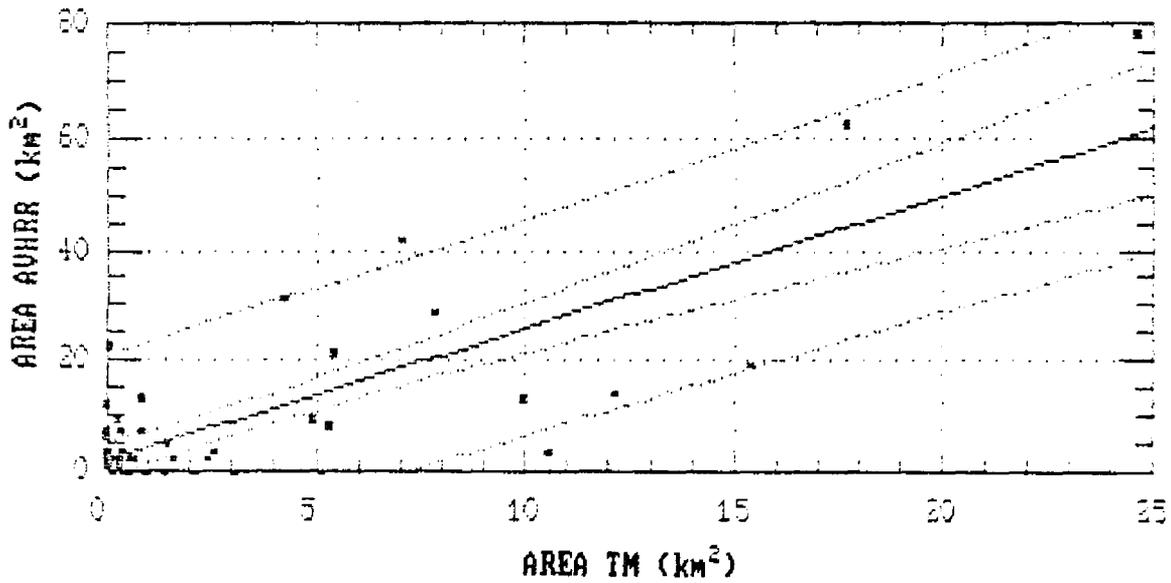


Fig. 4.17 - Reta da regressão linear calculada entre áreas queimadas estimadas pelo TM e AVHRR (níveis de 0 a 10).

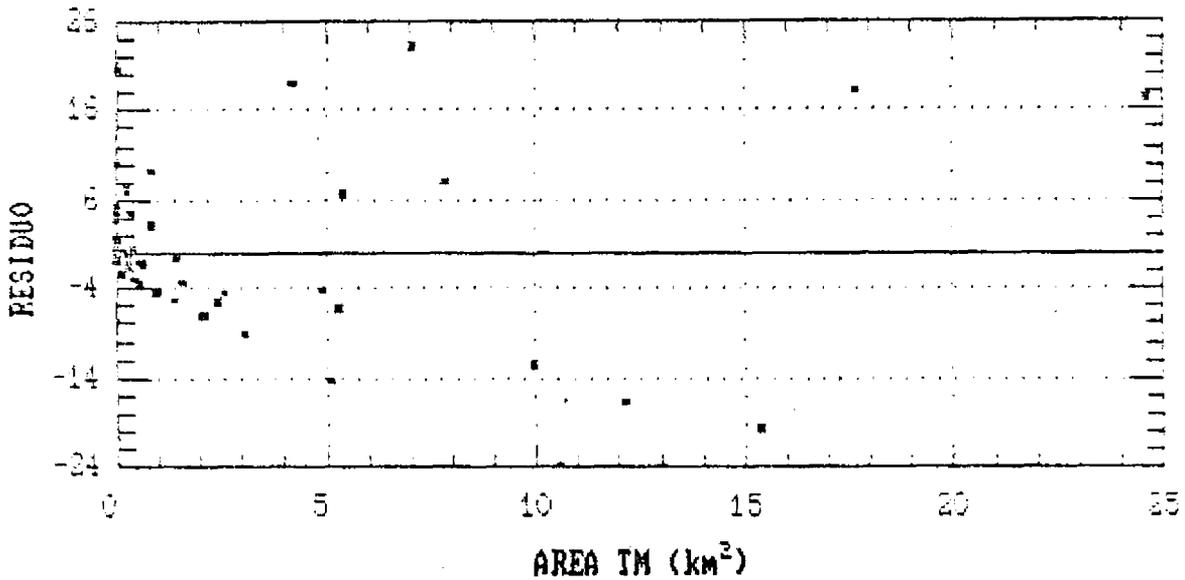


Fig. 4.18 - Resíduos estimados a partir da equação de regressão linear calculada entre áreas queimadas no TM e AVHRR (níveis de 0 a 10).

4.4 - MAGNITUDE DA ÁREA QUEIMADA PARA A REGIÃO DOS CERRADOS

A partir das médias diárias por subperíodo e dos dias de cada subperíodo, encontrou-se a área queimada em cada subperíodo; com a somatória das áreas dos subperíodos, encontrou-se uma área queimada inicial para o período de estudo, para todas as unidades de vegetação. Sobre esta área queimada inicial foi aplicada a equação gerada na Seção anterior, sendo obtida então a Tabela 4.8.

TABELA 4.8 - ÁREA QUEIMADA CORRIGIDA PARA AS UNIDADES DE VEGETAÇÃO DA REGIÃO DOS CERRADOS NA ESTAÇÃO SECA DE 1989

UNIDADE	ÁREA (km ²)	ÁREA QUEIMADA (km ²)	QUEIMA/ CERRADOS (%)	QUEIMA/ UNIDADE (%)
Cerradão	73513,37	1794,3	0,9	2,4
Campo-cerrado	654726,00	73720,6	3,4	11,3
Parque de cerrado	211007,80	37738,0	1,7	17,9
Campo	133886,10	8994,0	0,4	6,7
Cerrado antropismo	447058,50	35271,9	1,6	7,9
Área de tensão	371054,60	21460,8	1,0	5,8
Tensão antropismo	297045,70	16744,4	0,7	5,6
Região dos cerrados	2188292,00	195724,0	8,9	8,9

Estimou-se que a área queimada na região dos cerrados durante o período de estudo deste trabalho, em 1989, foi de 195.724,0km², correspondente a 8,9% da área total da região.

Algumas considerações devem ser feitas a respeito da possibilidade de subestimativa e superestimativa da área queimada. Com relação a fatores que possam causar uma superestimativa, dois citados na Seção 4.3.4 devem ser considerados:

- 1) é possível a detecção de queimadas ativas com área menor que o "pixel" AVHRR;

- 2) existe a possibilidade de confusão da classificação de queimadas no AVHRR com solo exposto.

Com relação a estes fatores, existe a possibilidade de corrigi-los através da equação de regressão. Com relação a subestimativa, um primeiro fator deve ser citado:

- 1) o cálculo utilizado não computou o mês completo de setembro (faltaram três subperíodos) nem o mês de outubro; tal decisão foi em consequência destes dados não serem considerados confiáveis devido ao elevado número de pontos na maioria das datas (mais de 100 mil pontos), fato que pode ter sido causado por problemas de confusão entre queimadas e solo exposto. Como em setembro e outubro há ocorrência de queimadas, esta decisão pode ter provocado diminuição na estimativa da área queimada.

Outros fatores já foram observados na Seção 4.2.2:

- 2) para a maioria (mais de 80%) das órbitas do satélite, a imagem AVHRR não cobre totalmente a região dos cerrados;
- 3) o sensor AVHRR detecta as queimadas ativas no momento da passagem do satélite, podendo não detectar queimadas ocorridas antes ou depois da passagem;
- 4) ausência de órbitas do satélite NOAA, nas quais provavelmente seria detectada um número de queimadas mais elevado que das órbitas presentes.

Outros fatores foram citados na revisão de literatura:

- 5) a utilização como área do "pixel" AVHRR do valor $1,2\text{km}^2$; este é o menor valor de área para os "pixels" de uma linha da imagem AVHRR pois é o valor ao nadir, enquanto que em ângulos de varredura do AVHRR maior que 0° (nadir), a área do pixel é maior;
- 6) a ocorrência de nuvens pode impedir a detecção de queimadas pelo AVHRR;
- 7) a classificação das queimadas no AVHRR com a faixa de 0 a 9 subestima o número de pontos de queimadas;
- 8) a própria classificação das queimadas no TM foi conservadora em termos de área, pois se procurou evitar confusão com outros alvos.

Os fatores 5) e 7) de subestimativa podem ser corrigidos pela equação de regressão. Já os demais fatores de subestimativa pouco ou nada são corrigidos pela equação de regressão; portanto, a tendência é que o cálculo de estimativa de área queimada subestime a verdadeira área queimada.

A partir dos dados da Tabela 4.8, foi estimado que para a região dos cerrados a frequência de queimadas é, em média, de cerca de onze anos; considerando apenas as unidades com estrato herbáceo dominante no cerrado (s.l.), a frequência é de oito anos. São valores abaixo do estimado por Coutinho (1980, 1990), que são de três anos em média, podendo ser este mais um fator a indicar a subestimativa da área queimada calculada para a região dos cerrados.

Entretanto, conforme já demonstrado na Seção 4.2.2, na estação seca do ano de 1989 os índices

pluviométricos foram acima da normal climatológica de uma estação típica, fato este que pode ter causado uma diminuição na área queimada em comparação a uma estação típica de queimadas, o que sugere que, apesar da subestimativa, os dados não estão tão distantes do real. Há que se considerar também que a aplicação da equação da regressão propicia a avaliação da magnitude da área queimada, visto que, com um R^2 de 0,57, a equação explica 57% das variações das áreas queimadas estimadas através do AVHRR.

Através da Tabela 4.8, pode ser observado que as unidades de vegetação campo-cerrado, parque de cerrado e áreas de cerrado com ação antrópica tiveram as maiores áreas queimadas na região, com 3,4%, 1,7% e 1,6%, respectivamente; para a relação área queimada por área da unidade de vegetação, as mesmas unidades anteriores tiveram os maiores valores, com 11,3%, 17,9% e 7,9%. Observa-se que, para este cálculo, há uma inversão entre campo-cerrado e parque de cerrado, o que mostra que nesta última unidade o uso de queimadas foi mais freqüente. É interessante notar que a utilização de queimadas no parque de cerrado é quase três vezes maior que a média da demais unidades. O uso do fogo nesta unidade pode ser tanto para o manejo de pastagens naturais como para implantação de projetos agropecuários, sendo tais fatos confirmados através das imagens TM/Landsat utilizadas neste trabalho. Também através das imagens TM foi observado que a ação antrópica ocorreu em áreas de campo-cerrado. A transformação das formações remanescentes dos cerrados em áreas de atividade humana já foi comentada na Seção 4.2.3, e os dados da Tabela 4.8 vêm confirmar ainda mais tal fato, indicando como unidades mais atingidas pelo fogo o parque de cerrado e o campo-cerrado.

Em termos de área total, o cerradão e os campo foram os de menor área queimada, enquanto em termos

de frequência do uso de queimadas o cerradão foi o que menos sofreu com a utilização do fogo; o que é uma indicação de que esta unidade foi a menos atingido pela ação antrópica.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando limitações técnicas e econômicas de métodos mais exatos, o uso de imagens AVHRR dos satélites NOAA mostrou-se adequado ao monitoramento quantitativo de queimadas na região dos cerrados.

São relacionadas a seguir as conclusões sobre o emprego do sensor AVHRR/NOAA de alta resolução temporal (61 imagens) e baixa resolução espacial, no estudo de queimadas nos cerrados, com base na calibração em área de controle (185 x 185km), em período de 16 dias, a partir de 2 imagens do sensor TM/Landsat de alta resolução espacial.

- 1) As queimadas ativas foram melhor caracterizadas na banda 3 do AVHRR/NOAA, ocupando a faixa de níveis de cinza com valores mais baixos, que variaram de 0 a 10 no ano de 1989, estando esta faixa sujeita a mudanças em função de alterações que possam ocorrer no sensor. A faixa utilizada em trabalhos anteriores era de 0 a 9, a qual com relação à faixa de 0 a 10, subestima em 20,2% o número de pontos de queimada em 1989. Ficou evidenciada na comparação com dados TM/Landsat a ocorrência de detecção de queimadas com tamanho menor que o "pixel" AVHRR, bem como a existência da possibilidade de confusão entre queimadas e solo exposto em áreas com ação antrópica, por ocasião da classificação das queimadas na banda 3 do AVHRR. Também nas bandas 1 e 2 as queimadas ocuparam faixas com baixos níveis de cinza, as quais não foram bem caracterizadas nestas bandas.

As áreas queimadas ocuparam faixas de baixos níveis de cinza nas bandas 3, 4 e 5 do TM/Landsat,

sendo superiores apenas aos níveis de cinza da água. Através da classificação automática, utilizando o método do paralelepípedo com as 3 bandas, as queimadas foram caracterizadas nas imagens, desde que sua assinatura espectral não tivesse sido afetada pela ação do vento e da chuva. Neste caso, pode ocorrer confusão com solo exposto ou com áreas de vegetação mais esparsa, como pastagens e parque de cerrado. A banda 4 foi a que melhor caracterizou áreas queimadas, pois nela os vários alvos apresentaram melhor contraste.

- 2) O comportamento temporal das queimadas no período de seca mostrou um crescimento do número de pontos de queimada até meados de agosto, atingindo maiores números na 2ª quinzena de agosto, chegando em média a 9.200 pontos por dia, e na 1ª quinzena de setembro, quando a média diária foi 7900 pontos de queimada. Com base na calibração AVHRR-TM para uma pequena área de controle, o número de queimadas foi subestimado em cerca de 26%, com a maioria dos casos ocorrendo em parque de cerrado. Das 42 queimadas localizadas nas imagens TM, 31 o foram também pelo AVHRR. Nove queimadas foram detectadas somente pelo AVHRR, não havendo pelas imagens TM certeza de que elas não tenham ocorrido. Com a comparação de imagens do AVHRR com as do TM, encontrou-se como continuidade média para as queimadas 2,6 dias.
- 3) A confecção de mapas (Apêndices D a H) com a distribuição espacial mensal e geral dos pontos de queimadas a partir de imagens AVHRR, permitiu observar que os pontos de queimada apresentaram-se distribuídos por quase toda região dos cerrados, com exceção da região do Pantanal Matogrossense,

tendo os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Piauí e Mato Grosso do Sul apresentado uma menor concentração de pontos. As seguintes regiões foram encontradas com concentração de queimadas:

- a) sul do Estado do Maranhão;
- b) leste-central do Estado de Tocantins;
- c) oeste-central do Estado da Bahia
- d) sul-central do Estado de Goiás.
- e) regiões centro-oeste e centro-leste do Estado de Mato Grosso.

Foi observado que nas áreas com concentração de queimadas no Estado de Mato Grosso não ocorreu um aumento na concentração das queimadas de julho para agosto como nas demais regiões, provavelmente devido ao aumento de precipitação em agosto.

A partir do mapa de vegetação IBGE/IBDF, com dados de 1983, e das imagens AVHRR de 1989, constatou-se que, além das áreas com ação antrópica, as áreas com formações remanescentes dos cerrados presenciaram durante a década de 80 a ação intensiva do homem com a implantação de atividades agropecuárias, principalmente nas regiões com concentração de queimadas. As unidades de vegetação com mais intenso uso de queimadas foram a parque de cerrado, campo-cerrado e áreas de cerrado com ação antrópica, sendo observada em imagens TM/Landsat a ação humana nestas áreas com atividades agropecuárias. Apenas na área de controle, as queimadas ocorreram na unidade de vegetação parque de cerrado (60%), em área de tensão ecológica com antropismo (21%), em área de campo-cerrado (12%), e

em cerrados com ação antrópica (7%). Para toda região dos cerrados, com base nas imagens AVHRR, a distribuição das queimadas foi (Tabela 5.1):

TABELA 5.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS QUEIMADAS PARA AS UNIDADES DE VEGETAÇÃO DA REGIÃO DOS CERRADOS NA ESTAÇÃO SECA DE 1989

UNIDADE	ÁREA QUEIMADA/ ÁREA DOS CERRADOS (%)	ÁREA QUEIMADA/ ÁREA DA UNIDADE (%)
Cerradão	0,9	2,4
Campo-cerrado	3,4	11,3
Parque de cerrado	1,7	17,9
Campo	0,4	6,7
Cerrado antropismo	1,6	7,9
Área de tensão	1,0	5,8
Tensão antropismo	0,7	5,6
Região dos cerrados	8,9	8,9

- 4) Para a comparação de áreas queimadas na área de controle, foi utilizada a regressão simples através do modelo linear para estabelecer uma relação entre áreas queimadas obtidas através do AVHRR e do TM. As equações encontradas foram:

$$\text{área_AVHRR} = 1,6256 + 2,0403 \times \text{área_TM},$$

para 10 níveis, com $R^2 = 0,56$;

$$\text{área_AVHRR} = 2,0072 + 2,3891 \times \text{área_TM},$$

para 11 níveis, com $R^2 = 0,63$.

A primeira equação foi utilizada para estimar a magnitude da área queimada na região dos cerrados, resultando em 196.000km^2 , ou seja, cerca de 9% da área da região. Em face de considerações sobre a metodologia utilizada, este dado é considerado uma subestimativa da verdadeira área queimada.

Quanto a trabalhos futuros, podem-se fazer algumas recomendações para melhorar os resultados apresentados acima:

- 1) Realização de experimentos em campo, com medidas precisas de localização, área e temperatura, e acompanhamento temporal de áreas queimadas, determinando as mudanças que ocorrem com o tempo devido a fatores como tipo de vegetação e condições meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade, cobertura de nuvens, velocidade e direção do vento). Com a determinação da resposta dos sensores AVHRR/NOAA e TM/Landsat para estas áreas queimadas, e tendo os fatores que influenciam na detecção bem determinados, será possível determinar causas e possibilidades de soluções para as confusões de classificação ocorridas entre queimadas e outros alvos, como solo exposto.
- 2) Acompanhamento anual da faixa dos níveis de cinza característicos das queimadas na banda 3 do AVHRR, visto que mudanças que ocorrem no sensor alteraram a faixa.
- 3) Geração, para futuros períodos de estiagem, de mapas mensais da distribuição espacial de queimadas na região dos cerrados, para melhor estudar a ecologia do fogo, inclusive a periodicidade em que as diferentes unidades de vegetação são atingidas, utilizando-se do banco de dados já montado para o presente trabalho.
- 4) Utilização dos resultados apresentados em trabalhos de controle e manejo de queimadas na região dos cerrados, levando em consideração as áreas, os períodos e unidades de vegetação onde ocorre concentração de queimadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adámoli, J.; Fukuhara, M.; Silva, J.A. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no estudo de queimas em pastagens nativas da região dos cerrados. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2., Brasília, DF, 1982. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1982. p. 811-820.
- Alencar, G. O programa de desenvolvimento da região dos cerrados. In: Simpósio sobre o Cerrado, 5., Brasília, DF, 1979. **Anais.** Brasília, DF, Editerra, 1980. p. 37-58.
- Azevedo, L.G.; Adámoli, J. Avaliação agroecológica dos recursos naturais da região dos cerrados. In: Simpósio sobre o Cerrado, 6., Brasília, DF, 1982. **Anais.** Planaltina, DF, EMBRAPA-CPAC, 1988. p. 729-761.
- Boletim Agroclimatológico Mensal**, v. 23, nº 1-12, 1989.
- Bourlière, F. J.; Hadley, M. Present-day savannas: an overview. In: Bourlière, F. **Tropical savannas.** Amsterdam, Elsevier, 1983. cap. 1, p. 1-17. (Ecosystems of the world, 13).
- Chen, S.C.; Shimabukuro, Y.E.; Hernandez Filho, P. **The mapping of burning area in forest by IMAGE-100 system.** São José dos Campos, INPE, 1979. 9p. (INPE-1431-RPE/009).
- Climanálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v.4, nº 1-12, 1989.
- Coutinho, L.M. As queimadas e seu papel ecológico. **Brasil Florestal**, (44):7-23, out.-nov.-dez. 1980.

- Coutinho, L.M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: J.G. Goldammer. **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges**. Berlin, Springer-Verlag, 1990. cap. 6, p. 82-103.
- Crutzen, P.J.; Delany, A.C.; Greenberg, J.; Haagenson, P.; Heidt, L.; Lueb, R.; Pollock, W.; Seiler, W.; Wartburg, A.; Zimmerman, P. Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. **Journal of Atmospheric Chemistry**, 2(3):233-256, Feb. 1985.
- Deshler, W. An examination of the extent of fire in the grassland and savanna of Africa along the southern side of the Sahara. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 9., Ann Arbor, MI, 1974. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1974, v. 1, p. 23-30.
- Dozier, J. **Satellite identification of surface radiant temperature fields of subpixel resolution**. Washington, DC, NOAA, 1980. 11p. (NOAA Technical Memorandum NESS, 113).
- _____ A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. **Remote Sensing of Environment**, 11(3):221-229, July 1981.
- Eiten, G. **Classificação da vegetação do Brasil**. Brasília, DF, CNPq, 1983. 305p.
- Engesaço. **Sistema de tratamento de imagens - SITIM: manual do sistema**. São José dos Campos, INPE, 1988.
- _____ **Sistema de informações geográficas: manual do usuário**. São José dos Campos, INPE, 1990. Versão 2.3.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária . Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (EMBRAPA.CPAC).

Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados: 1976-1977. Planaltina, DF, EMBRAPA.CPAC, 1978. 1v.

Espinoza, W.; Azevedo, L.G.; Jarreta Júnior, M. **O clima da região dos cerrados em relação à agricultura.**

Planaltina, DF, EMBRAPA-CPAC, 1982. 37p. (EMBRAPA.CPAC, Circular Técnica, 9)

Fernandes, A.E. **LEPT.** São José dos Campos, INPE, 1990a. Programa de computador.

_____ **GERAREP.** São José dos Campos, INPE, 1990b. Programa de computador.

Fernandes, A.E.; Figueiredo, D.C. **AJUSTE.** São José dos Campos, INPE, 1991. Programa de computador.

Ferri, M.G. Ecologia dos cerrados. In: Simpósio sobre o Cerrado, 4., Brasília, DF, 1976. **Anais.** Belo Horizonte, Itatiaia; São Paulo, EDUSP, 1977. p. 15-36. (Reconquista do Brasil, 38).

Figueiredo, D.C. **AJUSTE.** São José dos Campos, INPE, 1989a. Programa de computador.

_____ **Distorção geométrica das imagens AVHRR/NOAA.** São José dos Campos, INPE, 1989b. Comunicação pessoal.

_____ **FOCO.** São José dos Campos, INPE, 1989c. Programa de computador.

- Figueiredo, D.C. **Sistema de obtenção de índice de vegetação para a América do Sul por processamento de imagem.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1990. 107p. (INPE-5068-TDL/407).
- Flannigan, M.D. **Forest fire monitoring using the NOAA satellite series.** (Thesis for Degree of Master of Science) - Colorado State University, Fort Collins, CO, 1985. 59p.
- Frost, P.G.H.; Robertson, F. The ecological effects of fire in savannas. In: Walker, B.H. **Determinants of tropical savannas.** Oxford, IRL, 1987. cap. 5, p. 93-140.
- Gillon, D. The fire problem in tropical savannas. In: Bourlière, F. **Tropical savannas.** Amsterdam, Elsevier, 1983. cap. 30, p. 617-641. (Ecosystems of the world, 13).
- Greenberg, J.P.; Zimmerman, P.R.; Heidt, L.; Pollock, W. Hydrocarbon and carbon monoxide emissions from biomass burning in Brazil. **Journal of Geophysical Research,** 89(D1):1350-1354, Feb. 1984.
- Hirsh, S.N.; Kruckeberg, R.F.; Madden, F.M. The bispectral forest fire detection system. In: International Symposium on the Remote Sensing of Environment, 7., Ann Arbor, MI, 1971. **Proceedings.** Ann Arbor, MI, Institute of Science and Technology, 1971, v. 3, p. 2253-2272.
- Hitchcock H.C.; Hoffer, R.M. Mapping a recent forest fire with ERTS-1 MSS data. In: Shahrokhi, F. **Remote Sensing of Earth Resources.** Tullahoma, Tennessee, University of Tennessee, 1974, v. 3, p. 449-461.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística / Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBGE/IBDF).
Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro, IBGE, 1988.
- Iverson, L.R.; Cook, E.A.; Graham, R.L. A technique for extrapolation and validating forest cover across large regions. Calibrating AVHRR data with TM data.
International Journal of Remote Sensing, 10(11):1805-1812, Nov. 1989.
- Kaufman, Y.J.; Tucker, C.J.; Fung, I. Remote sensing for biomass burning: Method. In: **International Radiation Symposium**, Lille, France, Aug. 18-24, 1988.
- Kidwell, K.B. NOAA polar orbiter data (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8 , NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11 and NOAA-12):
User guide. Washington, DC, NOAA, 1991. 1v.
- Laporte, N. **Étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale: utilisation de données satellitaires NOAA-AVHRR sur l'Afrique de l'ouest.** (Thèse du doctorat en ecologie tropicale et télédétection spatiale) - Université Paul Sabatier, Toulouse, 1990. 231p.
- Lauer, D.T.; Krumpal, P.F. Testing the usefulness of ERTS-1 imagery for inventorying wildland resources in Northern California. In: **Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1**, New Carolton, MD, 1973. **Proceedings.** Washington, DC, NASA, 1973, v. 1, sec. A, p. 97-104.
- Malingreau, J.P. Remote sensing and disaster monitoring. A review of applications in Indonesia. In: **International Symposium on Remote Sensing of Environmental**, 18., Paris, France, 1984. **Proceedings.** Ann Arbor, MI, ERIM, 1984, v. 1, p. 283-297.

- Malingreau, J.P.; Tucker, C.J.; Laporte, N. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. **International Journal of Remote Sensing**, 10(4-5):855-867, Apr.-May 1989.
- Matson, M.; Dozier, J. Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 47(9):1311-1318, Sept. 1981.
- Matson, M.; Holben, B. Satellite detection of tropical burning in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 8(3):509-516, Mar. 1987.
- Matson, M.; Schneider, S.R.; Aldridge, B.; Satchwell, B. **Fire detection using the NOAA-series satellites.** Washington, DC, NOAA, 1984. 34p. (NOAA Technical Report NESDIS, 7).
- Matson, M.; Stephens, G.; Robinson, J. Fire detection using data from the NOAA-N satellites. **International Journal of Remote Sensing**, 8(7):961-970, July 1987.
- 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, 1986. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1986, v. 1, p. 464-471.
- Muirhead, K.; Cracknell, A.P. Identification of gas flares in the North Sea using satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 5(1):199-212, Jan.-Feb. 1984.
- Muirhead, K.; Cracknell, A.P. Straw burning over Great Britain detected by AVHRR. **International Journal of Remote Sensing**, 6(5):827-833, May 1985.

- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
NESDIS programs - NOAA satellite operations. Washington, DC, NOAA, 1985. 264p.
- Needham, B.H. AVHRR: next generation AVHRR - AMRIR.
Photogrametric Engineering and Remote Sensing,
54(9):1333-1335, Sept. 1988.
- Nelson, R.; Holben, B. Identifying deforestation in Brazil using multiresolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing,** **7(3):429-448, Mar. 1986.**
- Nelson, R.; Horning, N.; Stone, T.A. Determining the rate of forest conversion in Mato Grosso, Brazil, using Landsat MSS and AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing,** **8(12):1767-1784, Dec. 1987.**
- Pereira Jr, A.C.; Santos, J.R.; Pereira, M.C.
 Monitoramento de queimadas nas savanas brasileiras - uma abordagem multisensor. In: Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, 4., Bariloche, 1989. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1989, v. 2, p. 678-686.
- Pereira, M.C. **Deteção, 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, São José dos Campos, 1988. 268p.
 (INPE-4503-TDL/326).
-
- Nuvens reflexivas à luz solar na banda 3 das imagens AVHRR/NOAA.** São José dos Campos, INPE, 1989.
 Comunicação pessoal.

Pereira, M.C.; Setzer, A.W. Detecção de queimadas e plumas de fumaça na Amazônia através de imagens dos satélites NOAA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, RS, 1986. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1986, v. 1, p. 701-709.

Pereira, M.C.; Amaral, S.; Zerbini, N.J.; Setzer, A.W. Estimativa da área total queimada no Parque Nacional das Emas com o uso de imagens da banda 3 do AVHRR: comparação com estimativas do TM-Landsat. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, AM, 1990. **Anais**. São José dos Campos, 1990, v. 2, p. 302-310.

Pereira, M.D.B.; Batista, G.T. **Correlação de fitomassa verde de campo-cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS-Landsat e por radiometria de campo**. São José dos Campos, INPE, 1985. 13p. (INPE-3467-PRE/710).

Ponzoni, F.J.; Lee, D.C.L.; Hernandez Filho, P. Avaliação da área queimada e da regeneração da vegetação afetada pelo fogo na Parque Nacional de Brasília através de dados TM/Landsat. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Gramado, RS, 1986. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1986, v. 1, p. 615-621.

Price, J.C. Timing of NOAA afternoon passes. **International Journal of Remote Sensing**, 12(1):193-198, Jan. 1991.

Resck, D.V.S. **Parâmetros conservacionistas dos solos sob vegetação de cerrados**. Planaltina, DF, EMBRAPA.CPAC, 1981. 32p. (EMBRAPA.CPAC, Circular Técnica, 6).

Ribeiro, J.F.; Sano, S.M.; Macedo, J.; Silva, J.A. **Os principais tipos fisionômicos da região dos cerrados**. Planaltina, DF, EMBRAPA.CPAC, 1983. 28p. (EMBRAPA.CPAC, Boletim de Pesquisa, 21).

- Robinove, C.J. World-wide disaster warning monitoring and assestement with earth resources technology satellites. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10., Ann Arbor, MI, 1975. **Proceedings.** Ann Arbor, MI, ERIM, 1975, v. 2, p. 811-820.
- Robinson, J.M. Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, 12(1):3-24, Jan. 1991.
- Santos, J.R. **Biomassa aérea da vegetação de cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor "Thematic Mapper" do satélite Landsat.** (Tese de doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1988. 156p.
- Santos, J.R.; Aoki, H. Monitoramento do Parque Nacional de Brasília através de dados orbitais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1., São José dos Campos, 1978. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1981, v. 1, p.118-134.
- Santos, N.A.; Aguiar, J.L.P. **Evolução agropecuária da região nuclear dos cerrados: 1970-1980.** Planaltina, DF, EMBRAPA.CPAC, 1985. 62p. (EMBRAPA.CPAC, Documentos, 16).
- Sarmiento, G. The savannas of tropical America. In: Bourlière, F. **Tropical savannas.** Amsterdam, Elsevier, 1983. cap. 10, p. 245-288. (Ecosystems of the world, 13).
- Schowengerdt, R.A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing.** New York, Academic Press, 1983. 249p.

Seevers, P.M.; Drew, J.V. Evaluation of ERTS-1 imagery in mapping soil and range resources in the Sand Hills Region of Nebraska. In: Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1, New Carolton, MD, 1973. **Proceedings**. Washington, DC, NASA, 1973, v. 1, sec. A, p. 87-89.

Setzer, A.W.; Pereira, M.C.; Pereira Júnior, A.C.; Almeida, S.A.O. **Relatório de atividades do projeto IBDF/INPE "SEQE" - ano 1987**. São José dos Campos, INPE, 1988. (INPE-4534-RPE/565).

Setzer, A.W.; Pereira, M.C. Amazonia biomass burning in 1987 and estimate of their tropospheric emissions. **Ambio** 20(1):19-22, Feb. 1991.

Shimabukuro, Y.E.; Hernandez Filho, P.; Pereira, M.C.; Lee, D.C.; Santos, J.R. Queimadas no Parque Nacional das Emas em 1988. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, RN, 1988. **Painel**.

Silva, S.B.; Assis, J.S. Vegetação. In: Projeto RADAMBRASIL. **Folha SD.23 Brasília**. Rio de Janeiro, 1982. cap. 4, p. 461-528.

Soares, R.V.; Os incêndios florestais em florestas nativas. **Silvicultura em São Paulo**, 16A(parte 2):1185-1196, 1982. Trabalho apresentado no Congresso Nacional sobre Essências Nativas, Campos do Jordão, SP, 12-18 set. 1982.

Statistical Graphics. **Statgraphics: User's guide**. sl, STSC, 1986.

Townshend, J.R.G.; Tucker, C.J. Objective assessment of Advanced Very High Resolution Radiometer data for land cover mapping. **International Journal of Remote Sensing**, 5(2):497-504, Feb. 1984.

- Tucker, C.J.; Sellers, P.J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1395-1416, Nov. 1986.
- United State Geological Survey / National Oceanographic and Atmospheric Administration (USGS/NOAA). **Landsat 4 data users handbook**. Alexandria, VA, USGS, 1984. 1v.
- Walker, B.H. A general model of savanna structure and function. In: Walker, B.H. **Determinants of tropical savannas**. Oxford, IRL, 1987. cap. 1, p. 1-12.
- Warming, E. Lagoa Santa. Belo Horizonte, Imprensa Oficial do Estado, 1908. In: Ferri, M.G. **Lagoa Santa e a vegetação de cerrados brasileiros**. Belo Horizonte, Itatiaia; São Paulo, SP, EDUSP, 1973. p. 1-282.
- Warren, J.R. Infrared applications for forest fire management. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 14., San Jose, Costa Rica, 1980. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1980, v. 2, p. 957-965.
- Wightman, J.M. Detection, mapping, and estimation of rate of spread of grasses from southern African ERTS-1 imagery. In: Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1, New Carolton, MD, Mar. 5-9, 1973. **Proceedings**. Washington, DC, NASA, 1973, v. 1, sec. A, p. 593-601.
- Wilson, R.A. The remote surveillance of forest fires. **Applied Optics**, 5(6):899-904, June 1966.
- Wodwell, 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 Advanced Very High Resolution Radiometer imagery. **Journal of Geophysical Research**, 92(D2):2157-2163, 1987.

APÊNDICE A

IMAGENS AVHRR/NOAA 11 - ESTAÇÃO SECA DE 1989

APÊNDICE B

PONTOS DE QUEIMADA DETECTADOS EM IMAGENS AVHRR/NOAA-11
ESTAÇÃO SECA DE 1989

DATA	ÓRBITA	CRUZAMENTO COM EQUADOR HORÁRIO LONGITUDE	PERÍODO DE GRAVAÇÃO	BANDAS	FITA
10/06	3657	18.00.23 296.79	17.48.25/17.59.29	2,3	FQ005
11/06	3671	17.49.57 299.41	17.36.58/17.48.41	2,3	FQ001
12/06					
13/06	3699	17.29.05 304.66	17.15.13/17.28.43	2,3	FQ003
"	2ª parte				CC041
14/06	3713	17.18.38 307.28	17.05.02/17.18.30	2,3	FQ002
15/06	3727	17.08.12 309.91	16.55.02/17.08.15	2,3	FQ006
16/06	3741	16.57.46 312.53	16.45.53/16.58.00	2,3	FQ007
17/06	3755	16.47.20 315.15	16.34.04/16.47.46	2,3	FQ008
20/06	3798	17.58.07 297.50	17.44.36/17.56.50	1,2,3,4,5	FQ012
"	2ª parte				AM002
"	3ª parte				AM003
21/06					
22/06	3826	17.37.14 302.75	17.23.03/17.36.11	2,3	AM006
"	2ª parte				AM007
23/06	3840	16.26.46 305.39	17.13.22/17.26.30	1,2,3,4,5	AM010
"	2ª parte				AM011
"	3ª parte				AM012
24/06	3854	17.15.28 308.01	17.10.24/17.15.50	2,3	AM013
25/06					
26/06	3882	16.54.31 313.28	16.43.52/16.55.20	2,3	AM014
27/06	3896	16.44.02 315.91	16.31.46/16.45.35	2,3	AM019
30/06	3939	17.54.42 298.29	17.42.00/17.54.01	1,2,3,4,5	AM025
"	2ª parte				AM026
"	3ª parte				AM027
01/07	3953	17.44.13 300.93	17.32.26/17.43.35	2,3	AM028
02/07	3967	17.33.44 303.57	17.21.00/17.33.41	2,3	AM029
03/07	3981	17.23.15 306.20	17.11.04/17.23.23	2,3	AM018
04/07	3995	17.12.46 308.84	17.03.00/17.13.20	1,2,3,4,5	AM017
"	2ª parte				AM030
05/07	4009	17.02.16 311.48	16.49.00/17.03.04	2,3	AM031
"	2ª parte				AM033
09/07	4066	18.02.24 296.50	17.49.35/18.01.08	2,3	AM041
10/07	4080	17.51.55 299.14	17.39.04/17.51.15	2,3	AM042
11/07	4094	17.41.25 301.78	17.31.00/17.41.10	1,2,3,4,5	AM044
"	2ª parte				AM045
12/07	4108	17.30.55 304.42	17.18.08/17.30.57	2,3	AM047
13/07	4122	17.20.25 307.06	17.09.00/17.20.29	2,3	AM048
14/07	4136	17.09.55 309.70	16.56.50/17.10.30	1,2,3,4,5	AM050
"	2ª parte				AM051
"	3ª parte				AM052
15/07	4150	16.59.25 312.34	16.48.00/17.00.00	2,3	AM053
19/07	4207	17.59.30 297.38	17.52.00/17.58.31	2,3	AM062
20/07	4221	17.48.59 300.02	17.41.00/17.48.15	2,3	AM063
22/07	4249	17.27.58 305.31	17.18.00/17.28.10	2,3	AM069
25/07	4291	16.56.25 313.24	16.47.00/16.56.40	2,3	AM071
29/07	4348	17.56.26 298.26	17.44.00/17.55.50	2,3	AM079
30/07	4362	17.45.55 300.94	17.34.10/17.45.10	2,3	AM080
31/07	4376	17.35.23 303.58	17.23.00/17.35.20	2,3	AM083

(continua)

DATA	ÓRBITA	CRUZ. EQUADOR HORÁRIO LONGITUDE	PERÍODO GRAVAÇÃO	BANDAS	FITA
01/08	4390	17.24.52306.23	17.13.00/17.24.57	1,2,3,4,5	AM085
"	2ª parte				AM086
02/08	4409	17.14.20308.87	17.03.00/17.15.00	2,3	AM087
03/08	4418	17.03.18311.52	16.52.00/17.04.30	2,3	AM088
04/08	4432	16.53.16314.17	16.42.00/16.54.04	2,3	AM089
07/08	4475	18.03.46296.59	17.51.25/18.02.14	2,3	AM096
08/08	4489	17.53.14299.24	17.41.11/17.52.20	1,2,3,4,5	AM098
"	2ª parte				AM099
09/08	4503	17.42.42301.89	17.31.00/17.42.20	2,3	AM100
10/08	4517	17.32.10304.54	17.22.51/17.32.24	2,3	QQ001
11/08	4531	17.21.49306.89	17.11.00/17.22.08	2,3	QQ002
12/08	4545	17.11.17309.89	17.00.00/17.11.40	2,3	QQ003
13/08	4559	17.00.46312.18	16.49. /17.01.37	2,3	QQ004
14/08	4573	16.50.14314.83	16.39.00/16.51.00	2,3	QQ005
17/08	4616	18.08.46297.25	17.49.25/17.59.30	2,3	QQ011
18/08	4630	17.50.14299.89	17.37.47/17.49.30	1,2,3,4,5	QQ014
"	2ª parte				QQ015
19/08	4644	17.39.42302.54	17.28.00/17.39.20	2,3	QQ016
20/08	4658	17.29.10305.19	17.17.00/17.29.10	2,3	QQ017
24/08	4714	16.47.02315.78	16.39.00/16.47.48	1,2,3	QQ022
27/08	4757	17.57.31298.21	17.48.00/17.56.35	1,2,3	QQ029
"	2ª parte				QQ030
28/08	4771	17.46.58300.86	17.34.16/17.46.10	2,3	QQ021
29/08	4785	17.36.26303.51	17.23.14/17.36.05	1,2,3,4,5	QQ033
"	2ª parte				QQ034
"	3ª parte				QQ035
30/08	4799	17.25.53306.16	17.14.00/17.25.53	2,3	QQ032
31/08	4813	17.15.20308.81	17.05.00/17.15.36	1,2,3	QQ036
01/09	4827	17.04.47311.46	16.51.44/17.05.05	1,2,3	QQ037
"	2ª parte				QQ039
02/09	4841	16.54.14314.12	16.44.00/16.54.45	1,2,3	QQ040
"	2ª parte				QQ041
05/09	4884	18.04.41296.55	17.54.00/18.03.00	1,2,3,4,5	QQ048
"	2ª parte				QQ049
06/09	4898	17.54.08299.20	17.44. /17.53.10	1,2,3	QQ052
07/09	4912	17.43.35301.86	17.34.00/17.42.34	1,2,3	QQ053
08/09	4926	17.33.01304.51	17.23.00/17.32.40	1,2,3,4,5	QQ054
"	2ª parte				QQ055
09/09					
10/09	4954	17.11.54309.82	17.02. /17.12.00	1,2,3	QQ056
"	2ª parte				
Q057					
11/09	4968	17.01.21312.47	16.51.00/17.01.48	1,2,3	QQ058
"	2ª parte				QQ059
12/09	4982	16.50.47315.13	16.42.00/16.51.03	1,2,3	QQ061
"	2ª parte				QQ062

PONTOS DE QUEIMADAS DETECTADOS EM IMAGENS AVIARIADAS DE 1989 - REGIÃO DOS CERRADOS

TIPO DE VEGETAÇÃO	MES	DIA	CRUZ. EQUADOR		NIVEL DE CINZA										TOTAL	
			LONG.	LAGRA	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
REGIÃO CERRADOS	JUNHO	10	296.8	180023	15	7	5	2	6	1	2	7	4	6	55	
		11	299.4	174957	12	3	0	0	2	0	3	0	0	2	32	
		12														
		13	304.7	172905	46	26	11	7	7	9	9	5	10	11	143	
		14	307.3	171838	75	37	21	12	17	7	13	18	11	37	248	
		15	309.9	170612	32	20	21	7	15	13	9	7	15	16	155	
		16	312.5	165746	23	11	6	5	4	2	3	4	5	16	69	
		17	315.2	164720	53	30	22	16	18	13	17	14	19	34	236	
		20	297.5	175807	51	20	14	10	12	14	9	9	2	19	166	
		21														
		22	302.5	173714	100	70	37	43	38	45	43	44	41	99	560	
		23	305.4	162646	92	60	31	33	28	28	29	19	21	40	376	
		24	308.0	171529	77	60	36	19	31	28	23	12	36	64	325	
		25														
		26	313.3	165431	21	15	14	12	11	12	13	17	13	26	156	
		27	315.9	164462	10	8	5	5	6	8	7	4	4	11	69	
		30	298.3	175442												
	JULHO	1	300.9	174413	35	15	10	7	7	5	6	5	5	15	112	
		2	303.6	173344	38	20	14	7	14	7	6	13	9	23	151	
		3	306.2	172315	96	40	29	25	18	22	31	22	19	57	339	
		4	308.8	171246	117	66	55	30	35	36	47	38	51	81	556	
		5	311.5	170216	115	59	39	42	44	48	48	49	56	122	622	
		6														
		9	296.5	180224	13	7	6	4	5	3	4	5	4	3	51	
		10	299.1	175155	111	50	30	29	21	25	17	22	17	50	372	
		11	301.8	174125	112	78	41	48	59	40	32	45	39	89	582	
		12	304.4	173055	128	51	49	24	38	31	25	24	21	54	445	
		13	307.1	172025	304	188	134	113	104	115	95	100	107	250	1510	
		14	309.7	170955	415	256	236	201	206	212	205	237	249	553	2310	
		15	312.3	175925	276	185	180	135	136	156	147	145	163	357	1250	
16																
19	297.4	175930	269	216	175	147	152	185	156	166	193	466	2147			
20	300.0	174859	445	306	232	221	200	266	158	163	219	518	2660			
21																
22	305.3	172758	591	544	423	380	400	447	447	430	494	1223	5379			
23																
24																
25	313.2	164700	568	741	819	739	875	745	772	739	771	1695	3463			
26																
29	298.3	175626	29	9	10	5	8	9	7	5	10	12	116			
30	300.9	174555	39	25	31	12	10	14	13	10	7	28	139			
31	303.6	173523	25	21	14	12	13	10	5	8	25	27	160			
AGOSTO	1	306.2	172452	142	93	65	70	65	81	60	55	67	176	672		
	2	308.9	171420	247	197	174	152	140	180	192	171	227	471	2151		
	3	311.5	170318	376	285	293	259	292	305	320	323	357	772	3582		
	4	314.2	165316	239	166	151	135	166	147	172	177	199	425	1777		
	7	296.6	180346	36	12	17	10	11	8	9	8	9	24	144		
	8	299.2	175314	166	118	64	65	82	74	65	50	92	209	1025		
	9	301.9	174242	200	127	80	74	83	83	67	101	75	176	1062		

PONTOS DE QUEIMADAS DETECTADOS EM IMAGENS AVIAR/NDAAH DE 1985 - REGIÃO DOS CERRADOS

TIPO DE VEGETAÇÃO	MES	DIA	CRUZ. EQUADOR		NÍVEL DE CINZA									TOTAL		
			LONG.	HORA	9	8	7	6	5	4	3	2	1		0	
CERRADO COM ANTROPISMO	JUNHO	10	296.8	180023	4	0	0	0	1	0	1	2	1	1	10	
		11	299.4	174957	4	1	0	0	0	0	1	0	0	0	6	
		12														
		13	304.7	172905	10	8	4	0	2	0	1	0	1	1	27	
		14	307.3	171838	13	7	3	0	5	3	2	2	1	10	46	
		15	309.9	170812	6	2	2	0	5	2	2	2	0	1	22	
		16	312.5	165746	1	3	1	0	2	0	0	1	0	1	9	
		17	315.2	164726	1	2	2	1	2	0	0	0	1	1	10	
		20	297.5	175807	16	4	4	3	2	3	2	2	1	5	42	
		21														
		22	302.8	173714	30	29	4	11	16	15	14	10	19	29	177	
		23	305.4	162646	18	21	8	4	7	11	10	3	4	8	94	
		24	308.0	171528	13	5	4	1	4	4	3	0	5	3	42	
		25														
		26	313.3	163431	2	2	0	0	1	1	1	0	2	3	12	
		27	315.9	164402	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	4	
		30	298.3	175442												
	JULHO	1	300.9	174413	4	2	1	3	5	1	2	1	1	3	21	
		2	303.6	173344	6	2	2	1	2	1	1	2	1	5	23	
		3	306.2	172315	23	12	6	1	4	4	4	5	2	8	69	
		4	308.8	171246	13	11	5	2	4	3	4	2	4	12	60	
		5	311.5	170216	9	8	5	1	5	3	3	2	4	9	49	
		6														
		9	296.5	180224	3	1	1	2	1	1	0	0	0	3	12	
		10	299.1	175155	24	12	5	6	4	6	3	8	4	14	68	
		11	301.8	174125	26	21	13	14	15	8	4	10	8	13	132	
		12	304.4	173055	26	12	8	5	11	3	4	5	5	10	89	
		13	307.1	172025	54	29	17	20	17	14	15	10	19	34	229	
		14	309.7	170955	59	45	23	15	28	21	12	18	12	36	269	
		15	312.3	175925	28	7	10	5	8	9	5	8	12	25	117	
		16														
19	297.4	175930	63	55	37	25	38	30	20	23	25	62	375			
20	300.0	174859	98	64	39	21	24	34	24	23	37	65	429			
21																
22	305.3	172758	125	114	90	65	79	89	68	61	95	199	1020			
23																
24																
25	313.2	164700	41	68	78	58	69	52	70	53	53	127	669			
26																
29	298.3	175626	8	1	2	0	2	1	1	0	2	8	25			
30	300.9	174555	11	7	7	3	2	3	6	1	2	3	45			
31	303.6	173523	5	8	5	5	6	4	1	4	5	10	53			
AGOSTO	1	306.2	172452	32	25	13	16	11	16	17	15	12	43	208		
	2	308.9	171420	41	19	18	11	12	15	15	17	32	195			
	3	311.5	170318	35	16	19	8	14	13	19	14	25	47	210		
	4	314.2	165316	28	14	13	9	17	16	15	13	12	34	171		
	7	296.6	180346	8	7	4	2	2	2	1	0	4	3	33		
	8	299.2	175314	30	30	15	17	22	12	21	25	22	51	245		
	9	301.9	174242	27	14	10	6	9	8	15	19	15	21	134		

APÊNDICE C

UNIDADES DE VEGETAÇÃO - REGIÃO DOS CERRADOS

APÊNDICE D

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS -REGIÃO DOS CERRADOS
ESTAÇÃO SECA DE 1989

APÊNDICE E

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS
JUNHO DE 1989

APÊNDICE F

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS

JULHO DE 1989

APÊNDICE G

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS

AGOSTO DE 1989

APÊNDICE H

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS QUEIMADAS - REGIÃO DOS CERRADOS
SETEMBRO DE 1989