MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7119-RPQ/697

ESTIMATIVA DA ÁREA DE COBERTURA FLORESTAL AFETADA PELO INCÊNDIO EM RORAIMA, UTILIZANDO DADOS MULTI-SENSORES

Yosio Edemir Shimabukuro
João Roberto dos Santos
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo
Thelma Krug
*Laura Hess

***Universidade da Califórnia (USA)010 – Campus de Santa Bárbara**

INPE
São José dos Campos
1999

Equipe Técnica

Carlos Alberto Steffen

Chris Elvidge

Christiano Steffen

Gilberto Alves Vicente

Ivan Tavares de Lima

José Luis Rodríguez Yi

Madalena Niero Pereira

Michael Steinmayer

Moacir Godoy Júnior

Robert Laundry

Silvia Pardi La Cruz

Valéria Abrão Esteves

RESUMO

O desconhecimento da extensão real da área de cobertura florestal afetada pelo incêndio ocorrido em Roraima, nos primeiros meses de 1998, motivou o Ministério da Ciência e Tecnologia a solicitar ao INPE um estudo utilizando dados de satélites de observação da terra e meteorológicos. Para validar a informação obtida através destes dados, o Instituto realizou uma missão aerotransportada com uma câmara digital além de um trabalho de campo. Devido às condições meteorológicas desfavoráveis na região a partir de abril, a cobertura, por imagens do satélite Landsat somente foi concluída em agosto de 1998. Dados de outros satélites também foram utilizados, a exemplo do DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) e do satélite de radar RADARSAT. Os resultados aqui apresentados foram gerados a partir da interpretação digital ou visual das imagens do satélite Landsat, e apresentam boa concordância com resultados gerados por instituições, que utilizarem outras metodologias. Desta forma, conclui-se que a estimativa da área afetada pelo incêndio é próxima da real, devido à convergência de evidências – a similaridade de resultados apresentados por diferentes fontes e utilizando diferentes escalas. Finalmente, ressalta-se a necessidade de se discriminar a área afetada pelo incêndio em diferentes graus de queima: superficial, moderado e intenso. Técnicas de sensoriamento remoto, pela própria natureza dos dados, apresentam certas limitações para esta discriminação. Entretanto, trabalhos conjuntos com outras instituições, buscando utilizar toda a gama de dados disponíveis, certamente contribuirão para uma melhor caracterização dos danos ocorridos na área de floresta primária em Roraima devido ao incêndio.

ESTIMATION OF AREAL EXTENT OF FOREST COVER AFFECTED BY THE RORAIMA FIRES USING MULTISENSOR DATA

ABSTRACT

The lack of knowledge about the real extent of the primary forest area affected by fire in Roraima, in early 1998, motivated the Ministry of Science and Technology to request to INPE a study based on the use of earth observation and meteorological satellite data. In order to validate the information obtained from these data, the Institute conducted an airborne mission with a digital camera, in addition to fieldwork. Due to the critical meteorological conditions that affected the region from early April, the coverage by Landsat scenes was only concluded in August 1998. Data from other satellites were also used, as for example, the DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) and the radar satellite RADARSAT. The results presented here were obtained from digital or visual classification of Landsat imagery, and show a good agreement with results presented by institutions, using other methodologies. It can then be concluded that the estimate of the affected area is close to the real one, due to the convergence of evidence – the similarity of results obtained from different sources and at different scales. Finally, it is important to discriminate the area affected by the fire in different degrees of burning: superficial, moderate and intense. Remote sensing techniques, by the own nature of the data, present some limitations for this discrimination. However, joint research with other institutions, aiming at making the best use of all the data acquired in the region, will certainly contribute to a better characterization of the damage in primary forest area in Roraima due to fire.

Agradecimentos

Agradecemos:

- À NOAA, pelo fornecimento de imagens do satélite DMSP e pelo envio de dois de seus pesquisadores para a análise conjunta dos dados;
- Ao CCRS pela aquisição de imagens RADARSAT de Roraima e o envio de um pesquisador para realizar a análise conjunta dos dados;
- À UCSB, pelo apoio na missão de videografia e pelo envio de um de seus pesquisadores para realizar o treinamento da equipe brasileira;
- À Estação de Recepção de Cotopaxi (Equador) pela cessão de 2 imagens TM-Landsat de Roraima;
- À Brigada de Infantaria da Selva e ao pesquisador Reinaldo Imbrózio Barbosa (INPA) pelo apoio na definição das áreas a serem recobertas pelas faixas amostrais de videografia;
- Ao MCT por viabilizar os recursos financeiros para a realização do projeto;
- À FAPESP (processo n° 97/00943-8) que viabilizou a aquisição de dados de campo;
- Ao Dr. Bernardo Rudorff pela revisão e sugestões apresentadas na elaboração deste relatório.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS viii

LISTA DE TABELAS x

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 Breve histórico do projeto 1

1.2 Área de Estudo 4

2. DISPONIBILIDADE E PROCESSAMENTO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO 7

2.1 - Dados de Sensoriamento Remoto 7

2.1.1 – Videografia 10

2.1.2 – Imagens TM-Landsat 13

2.1.3 – Imagens DMSP 15

2.2 – Processamento de Dados 15

2.2.1 – Processamento de imagens videográficas 15

2.2.1.1 – Conversão de dados videográficos em dados digitais e codificação 16

2.2.1.2 – Mosaicagem das imagens na linha de vôo 17

2.2.1.3 - Interpretação visual das faixas e quantificação de classes 17

2.2.1.4 - Integração dos dados TM-Landsat e mosaico interpretado da área piloto ... 27

2.2.2 - Processamento das imagens TM-Landsat 28

2.2.3 - Processamento dos dados do DMSP e descrição dos produtos utilizados para a detecção de focos de incêndio 32

3. RESULTADOS 35

3.1 – Integração de Dados de Sensoriamento Remoto e de Campo 35

3.2 - Comparação entre os dados TM-Landsat e de Videografia para a Área Piloto .. 39

3.3 - Avaliação da área de Floresta Queimada através de imagens TM-Landsat 47

3.4 - Estimativa da área de cobertura florestal afetada pelo fogo 52

Pág.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 56

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 57

APÊNDICE A 58

APÊNDICE B 60

APÊNDICE C 62

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1 - Localização da área de estudo 8

2 – Configuração do sistema de videografia no avião Bandeirante do INPE 10

3 – Operações de sobrevôo planejadas (amarelo tracejado) e executadas (vermelho) Prioridades de imageamento (1,2,3,4), definidas em função da escassez de informação e/ou gravidade dos danos provocados pelo incêndio 11

4 – Aspecto das condições de cobertura de nuvem durante a fase de aquisição de dados videográficos 12

5 – Área do estado de Roraima recoberta pelas imagens TM-Landsat (demarcadas em branco) e focos de fogo detectados pelo DMSP entre 1 de janeiro e 31 de março de 1998 (demarcados em verde) 15

6 – Fluxograma da fase de processamento das imagens videográficas 16

7 – Exemplo de área florestal com queima de sub-bosque 19

8 – Exemplo de padrão de Floresta Queimada por fogo de superfície 19

9 – Exemplo de área florestal submetida a fogo de dossel 20

10 – Exemplo de padrão de área afetada pelo fogo de dossel em imagens videográficas 21

11 – Exemplos de padrões videográficos associados à classe Floresta Queimada 22

12 – Padrão videográfico associado à classe Floresta Não Queimada (em verde podem ser observadas árvores emergentes com sinais de caducifolia) 23

13 – Exemplos de padrões associados à classe Não Floresta Queimada em imagens videográficas 24

14 – Aspecto de área com sucessão secundária afetada por fogo 25

15 – Exemplo de padrão associado à classe Não Floresta Não Queimada 26

16 – Exemplo de padrão associado à classe Não Floresta Indeterminada 26

17 – Um aspecto do estrato herbáceo em recuperação em área de savana (maio de 1998) 27

18 – Metodologia para extração de informações de imagens TM-Landsat 29

19 – Exemplo de padrão da floresta antes e depois do incêndio (subcena da imagem 232/58) 29

20 - Imagens do DMSP adquiridas no período de janeiro a março de 1995 e de1998 .. 34

Pág.

21 – Superposição dos focos de fogo (círculos amarelos) reportados pela Brigada de Infantaria da Selva, sobre uma composição colorida TM3(B) TM4(G) TM5 (R) de imagens adquiridas em 11 e 19 de março 36

22 – Polígonos contendo sinais de incêndio em maio/1998 e sua posição sobre as imagens TM-Landsat que recobrem a região norte de Roraima (232/57; 232/58; e 233/58). Na ampliação, apresenta-se a localização dos polígonos sobre a composição colorida TM3(B) TM4(G) TM5 (R) das cenas obtidas até março de 1998 37

23 – Superposição das informações de campo (círculos rosa) e dos dados do satélite DMSP (polígonos amarelos, azuis e vermelhos) sobre a composição colorida TM-Landsat 38

24 – Superposição da área piloto (delimitada em branco) e do polígono afetado pelo incêndio (delimitado em azul) sobre o mosaico das cenas TM-Landsat (verde), os dados do DMSP (vermelho) e o mosaico das faixas videografadas (rosa) 39

25 – Mosaico videográfico interpretado da área piloto 44

26 – Superposição do mosaico videográfico nas imagens do DMSP 44

27 – Distribuição longitudinal das classes mapeada 45

28 – Superposição das imagens videográficas nas imagens do DMSP, mostrando floresta com crestamento foliar associada à focos de fogo com persistência superior a 5 dias, no mês de março 46

29 – Posição das imagens TM-Landsat utilizadas (A- analógicas; D- digitais) na estimativa de área de Floresta Queimada, superposta às imagens do DMSP 47

30 – Classificação da imagem TM-Landsat 232/58: verde escuro: Floresta Queimada; verde médio: Floresta Parcialmente Queimada; verde claro: Floresta Não Queimada; Outros: ocre 48

31 – Superposição da imagem TM/Landsat classificada com dados do DMSP. Os polígonos amarelos, azuis e vermelhos indicam focos de fogo com persistência superior a 5 dias em janeiro, fevereiro e março, respectivamente ... 50

32 – Posição das faixas amostrais, suas respectivas prioridades de imageamento e percentuais de cobertura vegetal afetada pelo incêndio florestal em Roraima .. 51

LISTA DE TABELAS

Pág.

1 – Área dos sistemas naturais e agroecosistemas de Roraima 4

2 – Dados de sensoriamento remoto utilizados na avaliação da área florestal afetada pelo incêndio em Roraima 8

3 – Características da operação de videografia planejada 11

4– Características da missão de videografia digital 13

5 – Imagens TM-Landsat utilizadas para estimar a área afetada pelo incêndio florestal em Roraima 14

6 – Premissas adotadas para comparar as estimativas obtidas através dos dados videográficos e das imagens TM-Landsat na área piloto 40

7 – Estimativa das áreas ocupadas por cada classe no mosaico videográfico da área piloto 41

8 – Estimativas de área ocupada por cada classe mapeada utilizando dados TM-Landsat e dados videográficos (área total equivalente), na área piloto 42

9 – Distribuição da área total imageada na videografia e pelo satélite Landsat nas diferentes classes estudadas, desconsiderando-se a classe nuvem e sombra de nuvem, na área piloto (área total equivalente) 42

10 - Estimativa da área de floresta atingida pelo incêndio em Roraima a partir da análise conjunta das imagens TM-Landsat de 1997 e 1998, referentes à cena 232/58 49

11 – Estimativa da área afetada pelo fogo nas faixas videografadas 52

Pág.

12 – Estimativa da área de floresta queimada no estado de Roraima a partir da interpretação das imagens TM - Landsat, comparadas às estimativas de campo fornecidas por Barbosa (1998) 53

13 - Estimativas de área de cobertura florestal afetada pelo incêndio em Roraima a partir de diferentes metodologias 53

14 – Comparação entre as diferentes estimativas do percentual de área de floresta afetada pelo incêndio em Roraima 55

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste relatório é apresentar os resultados do projeto de estimativa da área de formação florestal afetada pelo incêndio ocorrido no estado de Roraima, entre 01 de dezembro de 1997 e 31 de março de 1998. A estimativa foi obtida através de dados de sensoriamento remoto adquiridos por meio de sensores orbitais e aerotransportados. A interpretação destes dados foi amplamente apoiada em informações de campo provenientes de diversas fontes (Barbosa, 1998; Santos, 1998).

1.1 - Um breve histórico do projeto

Em janeiro de 1998, a imprensa começou a divulgar notícias inquietadoras sobre a possível ocorrência de um incêndio florestal no estado de Roraima. Como a presença de focos de fogo nas vastas formações savânicas de Roraima é decorrente de uma prática agrícola tradicional (Barbosa, 1998), não houve, por parte das autoridades locais, uma preocupação de prevenção contra um provável desastre ecológico.

Entretanto, a condição de extrema seca devido ao fenômeno *El Niño* (CPTEC, 1997) agravou o quadro de queimadas normalmente verificadas naquela região nos meses de janeiro e fevereiro, fazendo com que o fogo saísse fora de controle, gerando um incêndio florestal somente extinto com o início das chuvas, em 31 de março de 1998, pois tanto os governos local quanto federal não dispunham dos recursos materiais e humanos necessários para enfrentar um incêndio florestal do porte verificado.

Houve muita polêmica sobre os reais danos causados pelo incêndio em Roraima, principalmente sobre áreas florestais. Em abril, o assunto havia alcançado foros internacionais, provocando a visita de uma Missão da Organização das Nações Unidas (ONU) ao estado. Segundo esta missão, a extensão do incêndio, assim como sua intensidade, superaram as expectativas dos governos local e federal.

Dentre as observações da ONU, destacam-se três: (1) o fato de o incêndio ter atingido dimensão superior à esperada; (2) o fato de sua intensidade ter superado as expectativas do governo; e (3) a recomendação de que fosse realizado um estudo do impacto ambiental do desastre. O relatório ressalta, entretanto, que as estimativas da área afetada pelo fogo, até aquele ponto, eram derivadas de dados amostrais extrapolados e/ou informações qualitativas obtidas a partir de sobrevôos em áreas afetadas.

Consequentemente, não se dispunha também de estimativas confiáveis sobre a intensidade do fogo e as dimensões dos danos causados (Lima, 1998).

Estimativas subjetivas de áreas florestais afetadas pelo incêndio foram divulgadas pela imprensa e variaram de 3.000 km^2 a 12.000 km^2 (aproximadamente 1 a 5 % da área do estado, respectivamente).

Neste contexto, o INPE propôs ao Ministério de Ciência e Tecnologia o projeto "*Estimativa da área de cobertura florestal afetada pelo incêndio em Roraima, utilizando dados de multi-sensores*", doravante denominado Projeto Roraima. A metodologia adotada baseou-se em um critério de *convergência de evidências,* gerando estimativas da extensão da área afetada, da intensidade do fogo e do impacto causado aos ecossistemas naturais, dentro das potencialidades e limitações dos dados de sensoriamento remoto.

Inicialmente, fez-se um levantamento da disponibilidade de dados de diferentes sensores com potencial para responder às seguintes questões: (1) qual a área afetada pelo incêndio?; (2) quais os tipos de ecossistemas afetados?; (3) qual a intensidade do incêndio?; e (4) quais os danos (impactos) causados aos diferentes ecossistemas?

Estimativas das áreas afetadas pelo incêndio poderiam ser potencialmente geradas a partir da análise de dados do sensor *Thematic Mapper* do satélite Landsat-5 (doravante referenciado como TM-Landsat) ou por imagens do SAR (*Synthetic Aperture Radar*) do satélite RADARSAT, que opera na banda C. Entretanto, a utilização dos dados TM-Landsat ficou comprometida pela ausência de imagens livres de densa cobertura de nuvens, situação esta que perdurou de abril a agosto de 1998. Os dados do RADARSAT foram adquiridos, apenas em junho, após o interesse manifestado pelo CCRS (*Canadian Centre for Remote Sensing*) em avaliar a utilidade destes dados para a identificação da área afetada pelo incêndio. Devido à tardia data de aquisição das imagens (junho) e em condições de elevada precipitação, as imagens RADARSAT não permitiram a caracterização das áreas queimadas. A presença de chuvas, elevada umidade do dossel e regeneração da cobertura foliar removeram o efeito das alterações estruturais causadas pelo fogo sobre as propriedades de retro-espalhamento da tipologia florestal e savânica, fazendo com que o uso das imagens de radar, nesta banda C, fosse bastante limitado neste estudo.

A avaliação dos danos causados na floresta (destruição do dossel, destruição do sub-bosque etc.) poderia ser potencialmente feita em poucos dias através de dados de videografia digital, com recobrimento aéreo de toda a área crítica. A aquisição simultânea de dados GPS (*Global Positioning System*) permitiria que os dados videográficos fossem rapidamente georreferenciados e processados. Entretanto, as intensas chuvas na região, a partir de maio (quando foi iniciada a missão de videografia), fez com que os dados videográficos fossem adquiridos somente em algumas áreas amostrais.

Finalmente, o problema da intensidade do fogo poderia ser abordado através da análise dos dados do *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), os quais permitem identificar o número de focos de fogo numa dada área, avaliando sua persistência no tempo e sua intensidade. A utilização dos dados do DMSP, neste estudo, constituiu uma inovação, uma vez que os mesmos não são recebidos pelo Brasil de forma sistemática, como, a exemplo, dos dados do satélite meteorológico NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*). Em maio, uma comitiva americana em visita ao INPE, que incluía um pesquisador da NOAA, ofereceu ao INPE os dados do satélite DMSP para apoiar os trabalhos do Projeto Roraima, os quais foram especialmente processados e distribuídos ao Instituto a partir de junho, cobrindo o período de 01 de janeiro a 31 de março de 1998 (Apêndice B).

Antes de iniciar o Projeto Roraima, os seguintes itens foram observados: (1) se as imagens TM-Landsat disponíveis sem cobertura de nuvens, correspondiam às áreas com focos de incêndio em março, identificadas pelo DMSP; e (2) se os focos detectados pelo DMSP e as imagens TM-Landsat disponíveis eram coincidentes com as áreas críticas reportadas em relatório produzido pela Brigada de Infantaria da Selva (Carvalho, 1998), a qual participou da operação de combate ao incêndio desde 19 de março de 1998. Segundo o relatório de Carvalho (1998), havia *spots* de fogo no estado de Roraima inteiro, sendo que entre 19 e 26 de março este número aumentou de 22 para 46. É importante ressaltar, entretanto, que o conceito de *spot* utilizado pela Brigada de Infantaria da Selva não correspondia ao conceito convencional de *foco de incêndio*, onde um *spot* é composto por vários focos de incêndio, podendo, portanto, ser entendido como uma área extensa onde ocorrem diversos pontos de propagação de fogo.

Ainda, segundo Carvalho (1998), apesar dos focos estarem distribuídos por todo o estado, as regiões mais intensamente atingidas concentraram-se principalmente entre Traíra (ao norte) e o Parque Nacional de Viruá (ao sul). No Apêndice A reproduz-se a tabela fornecida por Carvalho (1998), com as coordenadas de todos os focos de incêndio identificados pela Brigada de Infantaria da Selva.

1.2 - Área de Estudo

O estado de Roraima ocupa uma área de 225.116 km^2, distribuída entre diferentes sistemas naturais e agrossistemas (Tabela 1). As savanas (localmente conhecidas como lavrados) têm sua maior extensão no centro-norte do estado. Seus solos rasos e endurecidos superficialmente são desfavoráveis ao desenvolvimento de espécies de sistema radicular profundo. Além disso, esses solos mantêm-se encharcados durante todo o período chuvoso, limitando o desenvolvimento de espécies não adaptadas à inundação. Poucas espécies sobrevivem às condições hidrológicas das savanas, caracterizadas por excesso de água no período chuvoso e escassez hídrica durante o período seco. A falta de água é facilmente contornada pela vegetação herbácea, de ciclo anual, formada principalmente por *Cypareaceae* e *Piaceae*, espécies mais comuns das savanas hidromórficas (Barbosa et al., 1997).

TABELA 1 – ÁREA DOS SISTEMAS NATURAIS E AGROECOSSISTEMAS DE RORAIMA

CLASSIFICAÇÃO NESTE RELATÓRIO	TIPO DE PAISAGEM	ÁREA (km^2)	% EM RELAÇÃO AO ESTADO
FLORESTA	Floresta primária de terra firme	154.823,0	68,8
	Floresta inundável	11.093,6	4,9
NÃO-FLORESTA	Floresta de terra firme antropizada	5.825,4	2,6
	Campina/Campinarana	12.839,7	5,7
	Savana	40.086,0	17,8
	Cidade	251,2	0,1
ÁGUA	Rios	197,1	0,1
TOTAL		**225.116,0**	**100,0**

FONTE: Adaptada de Barbosa (1998).

Nas regiões de campos existem manchas de solos permanentemente úmidos ao longo dos cursos de água, os quais são margeados por florestas galerias típicas ou por adensamento de buritis (*Mauritia flexuosa*). Nas nascentes dos rios, que drenam as formações campestres, formam-se depressões circulares ocupadas por buritizais ou por aningais (*Montrichardia arborescens*).

A oeste e a sul do estado de Roraima ocorrem florestas tropicais abertas, caracterizadas pela presença de cipós e palmáceas. Nas florestas altas, o sub-bosque é mais aberto, com maior distanciamento entre as árvores. As florestas em Roraima apresentam, em geral, menor diversidade do que o restante da floresta amazônica. Próximo à fronteira com a Venezuela, ocorre a floresta serrana e a floresta nebulosa. Esta última é caracterizada pela presença de musgos e epífitas. A sul do estado encontra-se o chamado Pantanal Setentrional, caracterizado por uma mistura de espécies vegetais herbáceas da família das *Bromeliáceas*, *Rapteáceas* e *Eriocauláceas*.

Esta cobertura vegetal do estado de Roraima encontra-se em íntima associação com o relevo, o clima e o solo da região. O relevo é caracterizado por extensas superfícies baixas cercadas por áreas serranas, consistindo de tabuleiros sedimentares esculpidos em rochas do Grupo Roraima, e de serras propriamente ditas, esculpidas em rochas pré-cambrianas do complexo Guianense. As superfícies baixas consistem de áreas submetidas a peneplanação em terrenos pleistocênicos da Formação Boa Vista, e em terrenos antigos do complexo Guianense. Estas áreas planas são interrompidas por relevos residuais do tipo *inselberg*. Na região de Bonfim, durante o período Cretáceo-Jurássico, houve a ocorrência de vulcanismo básico, que originou o relevo serrano de idade jurássica.

Nas áreas de relevos planos e faixas aluvionares ao longo dos rios ocorrem solos aluviais, planossolos e areias quartzosas. Nas regiões campestres que se desenvolvem sobre a formação Boa Vista ocorre o Latossolo Amarelo, solos concrecionários lateríticos, lateritas hidromórficas e areias quartzosas hidromórficas. Os melhores solos da região estão associados a remanescentes do vulcanismo jurássico, onde ocorrem pequenas faixas de terra roxa estruturada.

O incêndio florestal em Roraima ocorreu numa região com características similares àquelas encontradas no chamado arco de desflorestamento (Negreiros et al., 1996), ou seja,

na região limite entre as formações savânicas e florestais de Roraima. As regiões de floresta em Roraima estão sujeitas a incêndios florestais devido ao uso do fogo, como prática agrícola, à semelhança do que ocorre no arco de desflorestamento (Negreiros et al. 1996) pois: (1) é uma área sujeita a elevado grau de interferência antrópica (estradas e assentamentos rurais na floresta); e (2) possui um regime de chuvas representado por dois períodos bem distintos: **período úmido**, com totais mensais de 150 mm a 350 mm entre abril e agosto, e **período seco**, caracterizado por precipitações mensais inferiores a 50 mm e elevada deficiência hídrica no solo.

No tocante à interferência antrópica, o processo de colonização em Roraima cresceu intensamente nas décadas de 80 e 90. Caracterizou-se pela proliferação de pequenas propriedades (< 100 ha.) que se espalharam principalmente na região florestal de Caracaraí-Anauá, ao longo da BR–174 (Schaefer, 1997).

No tocante à escassez de chuvas no período seco, a análise da precipitação sobre o estado de Roraima entre os meses de janeiro e março de 1998 indicou a ocorrência de 37 dias sem chuva e 30 dias com precipitações diárias inferiores a 20 mm/dia (principalmente concentrados nas regiões sul e noroeste do estado). A única precipitação intensa verificada na região (100 mm em 24 horas) ocorreu no dia 31 de março de 1998, sendo responsável pela extinção do incêndio.

2. DISPONIBILIDADE E PROCESSAMENTO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

2.1 - Dados de Sensoriamento Remoto

Relatórios preliminares produzidos pelas equipes de combate ao fogo, por especialistas do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (MMA) e por pesquisadores da região (Barbosa, 1998) indicaram que o incêndio florestal em Roraima afetara grandes extensões de diferentes sistemas naturais, já submetidos ao fogo em anos anteriores (como savanas e áreas de desflorestamentos antigos e recentes) ou nunca anteriormente atingidos. Os primeiros incêndios tiveram o seu início tradicional em áreas de savana, já no final do mês de agosto de 1997 (fim do período úmido), segundo os moradores da região (Santos, 1998) e dados do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) do satélite NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) (Barbosa, 1998). Estes incêndios se estenderam para áreas de floresta a partir de março, de acordo com o relatório da Brigada de Infantaria da Selva (Apêndice A). A área mais afetada, onde os incêndios atingiram características de continuidade e contiguidade significativas, ficou compreendida entre as coordenadas 2° 00′00′′ N e 4° 00′00′′ N e 60°00′00′′ W e 62°00′00′′ W (Figura 1), onde se concentraram os levantamentos com videografia digital e imagens TM-Landsat. Os dados do DMSP abrangeram todo o estado de Roraima. Os dados de sensoriamento remoto utilizados neste estudo estão descritos na Tabela 2, que apresenta suas características básicas e aplicações.

Fig. 1- Localização da área de estudo

TABELA 2 – DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DA ÁREA FLORESTAL AFETADA PELO INCÊNDIO EM RORAIMA

DADOS	No. de CENAS Órbita/ Ponto	DATA	Lat/Long	ÁREA RECOBERTA km^2	% DA ÁREA DE RORAIMA	FINALIDADE
TM-Landsat	03 232/57 232/58 233/58	16/09/97 02/10/97 10/11/97	59°30´W a 62°30´W 1°45´N a 4°45´N	94. 000	41	Determinar limite Floresta/Não Floresta – área crítica
TM-Landsat	03 232/57 232/58 233/58	11/03/98 19/03/98 19/03/98	59°30´W a 62°30´W 1°45´N a 4°45´N	94. 000	41	Avaliar a representatividade da área estimada com a cena 232/58 em relação à incidência de fogo

(continua)

Tabela 2 - Conclusão

TM-Landsat	01 232/58	11/03/98	61°31′14′′W a 60°12′13′′W 03°46′18′′N a 02°01′12′′N	31.461	13	Estabelecer padrões de identificação de floresta afetada pelo fogo, e aferir a exatidão de mapeamento em relação às imagens videográficas
TM-Landsat	05 232/57 232/58 232/59 233/57 233/58	11/03/98 19/03/98 18/08/98 25/08/98 25/08/98	62° 33′26′′W a 60° 48′ 00′′W 05° 37′12′′N a 00° 19′36′′N	122.104	51	Estimar a área sujeita ao fogo
Radarsat	03	18/04/98 09/06/98 22/06/98	61°31′14′′W a 60°12′13′′W 03° 46′18′′N a 02° 01′12′′N	~100. 000	44	Estudar a viabilidade de utilização de dados RADARSAT na identificação de evidências de incêndio
Videografia - Área Piloto	3500	02 a 18/05/98	61° 45′5′′W a 61° 0′1′′W 2°29′2′′N a 3°01′4′′N	1.800	0,7	Aferir padrões de área afetada pelo fogo em imagens TM-Landsat e estimar o incremento da área afetada entre 11 e 31 de março para a área em que os dados são disponíveis
Videografia – Amostral	2000	02 a 18/05/98	60°W a 62°W 2°N a 4°N	1.095	0,4	Aferir padrões de área afetada pelo fogo em imagens TM-Landsat
DMSP	90	01/01/98 a 31/03/98	6°N a 2°S 57,5°W a 65,5° W	~ 800 .000	100	Identificar focos de incêndio; determinar o padrão de propagação do incêndio; determinar o tempo de permanência dos focos de incêndio

2.1.1 - Videografia

No período de 02 a 18 de maio de 1998, o INPE realizou operações de aerolevantamento em várias regiões do estado de Roraima, com o objetivo de adquirir dados videográficos das áreas florestais afetadas pelo incêndio. Para isto foi utilizada a aeronave Bandeirante do INPE, equipada com um sistema composto de uma câmara de vídeo digital acoplada a uma interface de posicionamento GPS (*Global Positioning System*), para dar suporte ao georreferenciamento das imagens (Figura 2).

Fig. 2 – Configuração do sistema de videografia no avião Bandeirante do INPE.

Foram preparados planos de vôo em três altitudes distintas: 3.000, 6.000 e 9.000 pés (com preferência deste último), antecipando possíveis dificuldades na aquisição dos dados, em função das condições meteorológicas desfavoráveis para este tipo de atividade. Para cada quadrícula de 1 grau x 1 grau nas áreas demarcadas na Figura 3 (tracejadas em amarelo), previa-se o quadro de operações resumido na Tabela 3.

Fig. 3 – Operações de sobrevôo planejadas (amarelo tracejado) e executadas (vermelho). Prioridades de Imageamento (1,2,3,4), definidas em função da escassez de informação e/ou gravidade dos danos provocados pelo incêndio.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DA OPERAÇÃO DE VIDEOGRAFIA PLANEJADA

Altura de vôo (pés)	Largura de faixa (m)	Nº de faixas	Nº de imagens
9 000	4.300	32	1.370
6 000	2.870	48	3.100
3 000	1.435	97	12.500

Devido às condições atmosféricas desfavoráveis à videografia (Figura 4), a aquisição de dados nas altitudes de 6.000 e 9.000 pés (que possibilitaria uma cobertura mais rápida da área a ser videografada) mostrou-se impraticável. Desta forma, a missão foi redimensionada para aquisição de dados na quadrícula delimitada pelas coordenadas

3°00′00′′S e 62°00′00′′W e 2°30′00′′S e 61°30′00′′W, onde o incêndio havia sido reconhecidamente intenso. Devido à dificuldade de se recobrir todas as faixas nesta quadrícula, estabeleceu-se um plano alternativo de cobertura, a partir de informações de especialistas do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), INPA (Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia) e IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), que se encontravam na área. Optou-se pelo levantamento em vários perfis transversais distribuídos em cinco áreas do estado, onde se noticiava a ocorrência de incêndio de efeitos pouco conhecidos. Adicionalmente, incluiu-se uma área de cobertura contínua (doravante denominada área piloto), com recobrimento longitudinal e lateral, englobando uma dimensão aproximada de 1.800 km^2. Esta área foi selecionada para auxiliar o processo de aferição dos dados TM-Landsat.

Fig. 4 – Aspecto das condições de cobertura de nuvem durante a fase de aquisição de dados videográficos.

As condições atmosféricas desfavoráveis à videografia, produzidas pela quase permanente cobertura de nuvens do tipo *cumulus* e as decorrentes chuvas esparsas e imprevisíveis em toda a região, forçaram as operações aéreas a ser desenvolvidas em alturas de vôo compreendidas entre 3.000 e 3.500 pés (altitudes possíveis para vôo visual). Entretanto, nessas altitudes, a turbulência é excessiva e somente a urgência e premente

necessidade de informações justificou a continuidade das operações, que se encerraram em 22 de maio. Uma síntese das características dos dados de videografia digital, após 20 dias de operação, é apresentada na Tabela 4 .

TABELA 4– CARACTERÍSTICAS DA MISSÃO DE VIDEOGRAFIA DIGITAL

Tempo de vôo de translado	31h20min
Tempo de vôo de aerolevantamento	23h20min
Altura do aerolevantamento	3.000 a 3.500 pés.
Número aproximado de imagens brutas obtidas	1.200.000 cenas (30 cenas/seg.)
Número aproximado de imagens úteis obtidas	4.500 cenas (destas, foram analisadas 2.895)
Superposição longitudinal (a cerca de 2.800 pés de altitude)	20%
Intervalo médio de captura	5 segundos
Área total imageada	3.600 km^2

2.1.2 – Imagens TM-Landsat

A intensa cobertura de nuvens na região, que perdurou de março a julho, restringiu a aquisição de imagens TM-Landsat úteis para o mapeamento das áreas florestais afetadas pelo fogo. As cenas de 1998 disponíveis até 19 de março, em número de quatro (Tabela 5), constituíram o conjunto de dados sobre os quais se iniciou este estudo. A partir de então, a percentagem de nuvens sobre as imagens adquiridas na região foi continuamente monitorada, tendo-se somente obtido novas cenas úteis (com cobertura aceitável de nuvens) a partir da agosto (Tabela 5). Todas as cenas foram obtidas em formato digital e analógico, nas bandas 3 (B), 4 (G) e 5 (R). Em síntese, os dados TM-Landsat disponíveis para desenvolver este trabalho, de março a meados de agosto, foram em número bastante limitado.

TABELA 5 – IMAGENS TM-LANDSAT UTILIZADAS PARA ESTIMAR A ÁREA AFETADA PELO INCÊNDIO FLORESTAL EM RORAIMA.

ÓRBITA/PONTO	DATA
233/58	10/11/97
232/57	16/09/97
232/58	02/10/97
232/58	11/03/98
232/58	11/03/98
233/58	19/03/98
232/59	19/03/98
232/57	18/08/98
232/58	18/08/98
233/58	24/07/98
233/57	25/08/98
233/58	25/08/98

A Figura 5 mostra a área do estado de Roraima recoberta pelas imagens TM-Landsat disponíveis (demarcadas em branco), correspondente a aproximadamente 51% da área total do estado. Esta área, segundo os relatórios de Barbosa (1998) e Carvalho (1998), abrange a quase totalidade da cobertura florestal afetada pelo fogo.

Fig. 5 – Área do estado de Roraima recoberta pelas imagens TM-Landsat (demarcadas em branco) e focos de fogo detectados pelo DMSP entre 1 de janeiro e 31 de março de 1998 (demarcados em verde).

2.1.3. - Imagens DMSP

Os dados do satélite DMSP ainda são pouco conhecidos e explorados pela comunidade de usuários de sensoriamento remoto no Brasil. Assim sendo, julgou-se oportuno apresentar, algumas informações básicas sobre este sistema, no Apêndice B. Os dados do DMSP utilizados neste projeto correspondem aos meses de janeiro, fevereiro e março de 1998 e recobrem todo o estado de Roraima.

2.2 – Processamento de Dados

2.2.1 - Processamento das Imagens Videográficas

A abordagem metodológica adotada para o processamento dos dados videográficos é apresentada na Figura 6.

Fig. 6 – Fluxograma da fase de processamento das imagens videográficas.

2.2.1.1 - Conversão dos dados videográficos em dados digitais e codificação

Inicialmente, os dados de vídeo (*frames*) foram convertidos em imagens digitais. Definiu-se, para tanto, uma taxa média de captura correspondente a uma cena a cada 4 segundos, resultando em uma sobreposição de 20 a 30% entre cenas adjacentes. As cenas foram codificadas com identificador de faixas e números seqüenciais. Cenas de 640 por 480 pixels foram capturadas e sua localização geográfica determinada através da superposição das imagens de vídeo aos dados GPS gravados na trilha sonora.

2.2.1.2 - Mosaicagem das imagens na linha de vôo

A geração do mosaico das linhas de vôo foi feita utilizando uma rotina computacional em IDL (*Interative Data Language*). Esta rotina, adaptada ao ENVI (*The Environment for Visualizing Images*), permitiu automatizar o processo de aquisição de pontos de controle para posterior georreferenciamento dos dados (Apêndice C). Possibilitou, também, a coleta de pontos de controle entre cenas adjacentes ao longo de uma faixa de vôo, os quais foram armazenados em tabelas. A seguir, selecionou-se da imagem um par de coordenadas para o qual existia um valor fixo de GPS, a partir do qual foram recalculadas as coordenadas de todos os pixels em cada faixa, dando origem a um mosaico-faixa georreferenciado. Uma descrição minuciosa do procedimento de mosaicagem automática é apresentada no Apêndice C.

2.2.1.3 - Interpretação visual das faixas e quantificação de classes

Os mosaicos gerados a partir dos dados de videografia digital resultaram em imagens coloridas com resolução espacial média de 1,4 m x 1,1 m, contendo aproximadamente 1.500 pixels e 30.000 linhas. Devido ao volume de dados, às condições de aquisição (nebulosidade variável), e ao prazo de interpretação requerido, optou-se por proceder a interpretação visual dos dados faixa por faixa.

A análise dos dados utilizou o sistema de processamento de imagens ENVI. Adotou-se esta solução em função de diversos fatores: (1) disponibilidade de várias estações para processamento de imagens, permitindo que diversos intérpretes trabalhassem simultaneamente; e (2) possibilidade de trabalhar com resolução plena no processo de visualização da faixa, facilitando a interpretação visual.

Tendo em vista que a aquisição das imagens de vídeo, neste projeto, tinha como objetivo complementar e aferir os resultados da análise de imagens TM-Landsat, definiu-se uma legenda compatível com a resolução dessas (30 x 30 m).

Assim sendo, foram definidas as seguintes classes de uso e cobertura vegetal: Floresta Queimada (FQ); Floresta Não Queimada (FNQ); Não Floresta Queimada (NFQ); Não Floresta Não Queimada (NFNQ); Nuvens/Sombra de Nuvens (NS) e Água (A).

A classe Floresta Queimada incluiu um amplo espectro de condições de alterações causadas pelo fogo. Os incêndios em área florestal estão sujeitos à queima de três tipos, em função de sua localização e intensidade: a) fogo de superfície; b) de dossel, e c) de solo.

O fogo de solo afeta até o nível do substrato mineral. É bastante destrutivo e, onde ocorre, o processo de regeneração pode ser muito lento. A característica mais importante deste tipo de fogo é a sua persistência no tempo. Não pode ser distinguido do fogo de superfície a partir de imagens videográficas, tendo em vista a necessidade de aquisições multi-temporais que mostrem a persistência do fogo no tempo. Ressalta-se que o incêndio florestal de Roraima não se enquadra neste tipo.

O fogo de superfície é o menos destrutivo, seja em ambiente de floresta ou de savana, pois apresenta baixo conteúdo de combustão e é de curta duração. Não produz temperaturas elevadas no solo e na própria planta, por ser geralmente alimentado por materiais de baixa combustão rapidamente conversíveis em cinzas. Não produz danos significativos às raízes. Este tipo de fogo foi também identificado em trabalho de campo, em áreas de floresta, tendo-se verificado que não produziu danos significativos às árvores maduras. Por outro lado, o sub-bosque, caracterizado pela presença de indivíduos com DAP (Diâmetro à Altura do Peito) inferior a 10 cm, sofreu significativa ação do fogo, conforme análise preliminar de dados de inventário, reportados em Santos (1998) e IBAMA (1998). O fogo chegou a atingir cerca de 50% dos indivíduos com DAP inferior a 10 cm, afetando principalmente a camada arbustiva-herbácea, onde o manto de serrapilheira espesso e seco contribuiu para a propagação da queima. O fogo de superfície pode ser facilmente reconhecido em campo, pelo crestamento foliar, ressecamento das folhas, queima da base e morte dos indivíduos (Figura 7), e foi inferido em imagens videográficas pela redução do vigor do dossel superior, presença de clareiras na mata (escuras nas imagens) e de árvores esparsas queimadas, conforme padrão observado na Figura 8.

Fig. 7 – Exemplo de área florestal com queima de sub-bosque.

Fig. 8 – Exemplo de padrão de Floresta Queimada por fogo de superfície.

O fogo de dossel ocorre nas partes superiores das árvores, concomitante ao fogo de superfície, ou seja, se o fogo atinge o dossel, pode-se admitir que a superfície foi totalmente afetada. O fogo de dossel pode ser devastador, consumindo árvores maduras, derrubando galhos e propagando o incêndio para amplas áreas.

A ocorrência de espécies florestais mais susceptíveis à ação do fogo (de maior capacidade de queima) e de indivíduos emergentes maduros (com fendilhamento de fuste/casca), favoreceu a oxigenação devido à queima, permitindo o crestamento do dossel de outras árvores. Este tipo de queima pode ser observado na Figura 9.

Fig. 9 – Exemplo de área florestal submetida a fogo de dossel.

Em algumas florestas, sob condições naturais, o fogo de dossel tem também um papel renovador do estoque de plantas, visto que aumenta a penetração de luz para os estratos inferiores da floresta. Este tipo de fogo é facilmente identificado nas imagens videográficas pela presença de dossel carbonizado das espécies emergentes e pela cor magenta associada às áreas queimadas.

Em função da intensidade do fogo e do grau de dano causado ao dossel, as áreas afetadas apresentaram diferentes matizes de magenta. Como as imagens de vídeo foram

obtidas aproximadamente um mês após o início das chuvas, pode-se também observar a recuperação do dossel pela presença de verde de algumas espécies florestais (Figura 10).

Fig. 10 – Exemplo de padrão de área afetada pelo fogo de dossel em imagens videográficas.

Nesta figura, a cor magenta foi associada às áreas de Floresta Queimada atingidas pelo fogo, e a cor verde escuro às áreas de Floresta Não Queimada. As áreas que apresentam um tom verde mais claro podem estar associadas às áreas queimadas em processo de recuperação, face ao aumento de radiação solar no sub-bosque. Em função da extensão e da intensidade das manchas magenta (mais claras ou mais escuras) nas imagens videográficas, pode-se inferir o grau do dano provocado pelo fogo. Nas áreas com alto índice de crestamento do dossel, há extensas áreas de cor magenta escuro, indicando não só a destruição da massa foliar, mas também a carbonização de troncos. Nestas áreas pode-se inferir uma ação mais direta do fogo nos estratos inferiores da floresta, com queima significativa de fustes, galhos e ramos dos indivíduos com maior capacidade de combustão.

A Figura 11 ilustra os diferentes padrões videográficos associados aos distintos graus de dano causados pelo fogo, os quais foram englobados em uma única classe (Floresta Queimada).

Fig. 11 – Exemplos de padrões videográficos associados à classe Floresta Queimada.

As áreas de Floresta Não Queimada apresentaram cor verde e textura rugosa, sendo possível, em função da resolução espacial dos dados videográficos, a identificação das copas das árvores e a ausência de crestamento foliar. Tendo em vista que um dos objetivos do trabalho era comparar e validar a informação dos dados TM-Landsat, foi definida uma unidade mínima de mapeamento para a classe Floresta Não Queimada (assim como para as demais). Estabeleceu-se como critério para a classe Floresta Não Queimada a presença de manchas de floresta intacta em área superior a 15 ha. A Figura 12 ilustra o padrão fotográfico associado a esta classe.

Fig. 12 – Padrão videográfico associado à classe Floresta Não Queimada (em verde podem ser observadas árvores emergentes com sinais de caducifolia)

A classe Não Floresta incluiu tanto as áreas de vegetação natural não arbórea quanto as áreas de ação antrópica. Correspondeu às áreas de savanas (alagáveis ou não–alagáveis) e às áreas de uso da terra associadas a pastagens, áreas agrícolas e desflorestamento.. Esta classe foi também particionada em Queimada e Não Queimada em função da presença ou não de indícios da ação de fogo.

A classe Não Floresta apresentou uma diversidade de padrões videográficos associados à textura, à cor e ao formato, em função do tipo de material utilizado na combustão e da intensidade da queima.

O período de aquisição das imagens videográficas (principalmente nas faixas amostrais em formações savânicas) inviabilizou, muitas vezes, a identificação de vestígios de queima, devido à rápida recuperação das formações gramíneo lenhosas. Assim sendo, criou-se, adicionalmente, a legenda Não Floresta Indeterminada, para definir áreas de Não

Floresta que não puderam ser identificadas através das imagens de vídeo, como Queimada ou Não Queimada.

A Figura 13 ilustra alguns padrões fotográficos associados à classe Não Floresta Queimada. Pode-se observar que os elementos arbóreo-arbustivos em campos inundáveis apresentam indícios de crestamento do dossel e que a vegetação de gramíneas ainda não tinha tido tempo suficiente para recuperação, devido à falta de umidade no solo.

Fig. 13 – Exemplos de padrões associados à classe Não Floresta Queimada em imagens videográficas.

Os estádios de sucessão secundária, em seus vários níveis de regeneração, também sofreram a ação do fogo, como pode ser observado na Figura 14.

Fig. 14 – Aspecto de área com sucessão secundária afetada por fogo.

A Figura 15 ilustra um exemplo de padrão associado à classe Não Floresta Não Queimada. Pode-se observar que os troncos, nas áreas desmatadas, não se encontram carbonizados, e que a floresta adjacente não apresenta indícios de crestamento do dossel. As manchas escuras são efeitos de sombreamento. A Figura 16 ilustra um exemplo de padrão de difícil associação às áreas afetadas pelo fogo ou não. Verifica-se que há manchas escuras no solo, sugerindo a presença de vegetação carbonizada e cinzas. Há também arbustos de cor escura que podem indicar crestamento, além de áreas onde não houve recuperação da vegetação de gramíneas. Por outro lado, observa-se a presença de uma estrada submersa, indicando tratar-se de uma região em processo de alagamento, onde a ausência de vegetação pode estar associada à presença de solos hidromórficos. As manchas escuras podem indicar saturação hídrica do solo. Portanto, os elementos de reconhecimento do terreno são ambíguos, e não permitem uma classificação inequívoca das condições da área no tocante à queima.

Fig.15 – Exemplo de padrão associado à classe Não Floresta Não Queimada.

Fig. 16 – Exemplo de padrão associado à classe Não Floresta Indeterminada.

A Figura 17 apresenta um exemplo de área de difícil identificação de sinais de queimada. Pode-se observar que em maio a vegetação já havia se recuperado, e que os indícios de queimada, mesmo em campo, são muito sutis.

Fig. 17 – Um aspecto do estrato herbáceo em recuperação em área de savana (maio de 1998).

Além das classes anteriormente descritas, incluiu-se também na legenda temática as classes Nuvem/Sombra de Nuvem e Água.

2.2.1.4 - Integração dos dados TM-Landsat e mosaico interpretado da área piloto

O primeiro passo para integrar os dados TM-Landsat e os dados da videografia digital consistiu no registro das faixas mosaicadas às imagens TM-Landsat restauradas para resolução espacial de 5 m por 5 m (Richards, 1993). O procedimento de restauração foi executado em ambiente SPRING (Sistema de Processamento de Informações Geográficas) e a mosaicagem em ambiente PCI (EASI/PACE, 1993). Foram coletados pontos de controle nos mosaicos-faixas e nas imagens, até que a precisão de registro apresentasse um erro médio quadrático de, no máximo, 30 metros.

2.2.2 - Processamento das imagens TM-Landsat

A metodologia para extração de informações sobre a área afetada pelo incêndio, a partir de imagens TM-Landsat, está sumariada na Figura 18. De janeiro a março de 1998, foram obtidas três imagens referentes ao ano de 1998 (Tabela 5). Dessas, apenas uma (232/58) possuía qualidade suficiente para avaliar os efeitos do incêndio. As restantes estavam extremamente comprometidas devido a presença de nuvens e sombra de nuvens. Considerando a limitação do número de imagens disponíveis até março (apenas a cena 232/58) e o fato das imagens do DMSP indicarem que esta correspondia à área mais severamente afetada pelo incêndio, optou-se por selecionar, dentro da imagem disponível, uma área piloto para a qual foi desenvolvida uma metodologia para avaliação de danos causados pelo fogo. Esses resultados foram comparados aos da videografia digital para aferição dos padrões de queima, comparação de resultados, e possível extrapolação da metodologia para toda a imagem.

Somente nos meses de julho e agosto foi possível obter um novo conjunto de imagens TM-Landsat com qualidade aceitável para processamento digital (Tabela 5). As imagens referentes às órbitas 232/57 e 232/58 foram processadas digitalmente, por ainda apresentarem evidências do incêndio em área de floresta (Figura 19). As imagens correspondentes às órbitas 233/57, 233/58 e 232/59 apresentaram somente qualidade para análise visual. Esse conjunto de dados (cenas 232/57, 232/58, 233/57, 233/58 e 232/59) permitiu, finalmente, compor um quadro da extensão total da área do estado mais afetada pelo incêndio.

As imagens TM-Landsat foram georreferenciadas a partir de cartas topográficas na escala 1:250.000, para permitir o registro das mesmas a outros tipos de dados (DMSP, videográficos, de campo).

Fig. 18 – Metodologia para extração de informações de imagens TM-Landsat.

Fig. 19 – Exemplo de padrão da floresta antes e depois do incêndio (subcena da imagem 232/58).

O segundo passo do trabalho foi desenvolver e testar diversas metodologias de classificação da área afetada pelos incêndios em uma área piloto, para a qual os dados de videografia digital encontravam-se disponíveis. Uma vez comparados e avaliados os resultados da classificação da imagem TM-Landsat com a classificação resultante da videografia, esta foi estendida para as cenas 232/58 e 232/57.

Primeiramente, foi processada a imagem de 2 de outubro de 1997 (bandas TM 3, 4 e 5) com o objetivo de distinguir as áreas ocupadas por floresta daquelas ocupadas por savana ou antropizadas (esta última, tanto em áreas de floresta quanto em áreas de savana). Assim sendo, foi criada uma legenda contendo as seguintes classes: Floresta, Não Floresta (savana e áreas desmatadas em geral), Água (rios, lagos) e Nuvens e Sombra de Nuvens.

Para a classificação das imagens utilizou-se uma adaptação da metodologia proposta em Shimabukuro et al. (1997) para o projeto PRODES (Projeto de Estimativa de Desflorestamento Bruto da Amazônia) digital, e já aplicada operacionalmente na estratificação de formações florestais e savânicas na região de Alto Alegre e Mucajaí (Roraima) a partir de dados de sensores ópticos e de microondas (Santos et al., 1998).

As bandas originais 3, 4, e 5 das imagens TM-Landsat de setembro e outubro de 1997 foram reamostradas para um tamanho de pixel de 60 m por 60 m (para reduzir o tempo de processamento) e transferidas para o Banco de Dados do SPRING (versão 3.0.1). Essas imagens foram utilizadas como dados de entrada para um modelo linear de mistura espectral utilizando o algoritmo de mínimos quadrados com restrições. Assim, foram obtidas as imagens-fração das componentes vegetação, solo e sombra (Shimabukuro et al., 1997).

A imagem-fração segmentada (limiares de similaridade e de área de 8 e 25, respectivamente) da componente sombra foi submetida a um processo de classificação por regiões. O resultado da segmentação foi inspecionado visualmente e mostrou uma boa delimitação das áreas de Floresta e Não Floresta. Após a segmentação executou-se uma classificação não supervisionada utilizando-se o algoritmo ISOSEG com um limiar de probabilidade de 0,95. O resultado permitiu a discriminação de sete classes, as quais foram editadas e reagrupadas durante o processo de mapeamento para as classes anteriormente citadas.

Além do processamento digital foi realizada uma classificação das áreas de Floresta e Não Floresta pelo método de interpretação visual da imagem em papel fotográfico, composição colorida R (TM5), G (TM4), B (TM3). Esta classificação visual teve como objetivo aferir o resultado da classificação digital.

Uma vez processadas as imagens TM-Landsat de 1997, procedeu-se à avaliação das áreas afetadas pelo incêndio na imagem de 11 de março de 1998. Para a avaliação das área afetadas pelo incêndio utilizaram-se duas abordagens, descritas a seguir:

1 – Classificação a partir das bandas originais TM3, TM4 e TM5

Para essa classificação utilizou-se um algoritmo de classificação supervisionada com base no critério de máxima verossimilhança. As amostras foram coletadas na imagem TM-Landsat e comparadas com o material de videografia da área piloto. O resultado desta classificação foi comparado e analisado ao obtido pela equipe que executou a classificação do material videográfico.

2- Classificação a partir das imagens fração resultantes do modelo de mistura

Esta segunda abordagem foi realizada a partir da aplicação do modelo de mistura à imagen TM-Landsat de 11 de março de 1998. A análise das imagens fração indicou que a componente vegetação foi a mais sensível à detecção de áreas afetadas pelo fogo, principalmente em áreas de floresta.

A seguir, executou-se a segmentação da imagem-fração vegetação, utilizando uma combinação de limiares de similaridade e de área iguais a 7 e 25, respectivamente. Foi então realizada uma classificação supervisionada por regiões pelo algoritmo de Battacharya. Os resultados indicaram ser possível discriminar a área afetada pelo incêndio em duas classes: Área de Floresta Queimada e Área de Floresta Parcialmente Queimada. Os resultados também foram comparados aos de videografia da área piloto e das faixas amostrais.

A estratificação temática desta classificação mostra que é factível discriminar entre áreas de Floresta Queimada daquelas Parcialmente Queimadas. Entretanto, neste trabalho julgou-se não ser apropriada esta discriminação devido aos seguintes fatores: (1) não se dispor de uma série histórica de imagens TM-Landsat desde o início até o fim do incêndio; (2) não se dispor de dados com qualidade homogênea para tratamento digital; (3) os sinais

da presença de fogo nas áreas parcialmente queimadas podem se tornar ambíguos nas imagens adquiridas após seis meses do evento.

Os resultados da classificação da imagem de 1998 foram cruzados com o resultado da classificação das áreas de Floresta e Não Floresta na imagem-fração sombra de 1997. Os pixels da Floresta Queimada e/ou Parcialmente Queimada de 1998, coincidentes com os pixels de Floresta existentes em 1997, forneceram uma estimativa da área de Floresta Queimada, descontando-se as áreas de Nuvens e Sombra de Nuvens existentes em ambas as datas (1997 e 1998).

As três cenas com qualidade para análise analógica foram submetidas à interpretação visual e os resultados incorporados à base digital georreferenciada do projeto, para gerar a estimativa da área total de Floresta Afetada pelo Incêndio no estado.

2.2.3 – Processamento dos dados do DMSP e descrição dos produtos utilizados para a detecção de focos de incêndio.

A geração de imagens noturnas do OLS (*Operational Line Scan Ssystem*) a bordo do DMSP exige grande exatidão de localização, obtida a partir da utilização de um modelo orbital desenvolvido pela Força Aérea Americana, que recalcula o posicionamento do satélite a partir de observações feitas por radares de bordo. O *National Geophysical Data Center* – NGDC desenvolveu também um sistema que permite a projeção das imagens do OLS em um sistema de grades com espaçamento de 30 segundos de arco a partir das informações sobre a posição do satélite, modelo do sensor, modelo da terra e correções de terreno. A precisão de localização é de aproximadamente 1 km.

Os focos de incêndio, ou a presença de fogo na superfície da terra, são discriminados das demais fontes de luz (cidades, vilas etc.), por serem fontes efêmeras de radiação. Para distinguir os focos de incêndio - da luz proveniente de outras fontes - torna-se necessária a utilização de séries temporais de dados, que permitem identificar todas as fontes persistentes de luz (fontes estáveis) e construir uma máscara, a qual é utilizada para identificar as fontes efêmeras.

Para a avaliação do incêndio em Roraima, o NGDC utilizou uma máscara de luzes estáveis derivada de uma série histórica de imagens sem cobertura de nuvem obtidas entre 1 de outubro de 1994 e 31 de março de 1995, durante o ciclo de lua nova.

A classificação dos focos de fogo foi realizada a partir de um algoritmo baseado em um limiar adaptável (*adaptative thresholding*), que permitiu separar as fontes de luz da iluminação de fundo. Este algoritmo permitiu também evitar a classificação de nuvens iluminadas pela Lua e a reflexão especular de corpos de água como focos de fogo. A banda termal foi utilizada para identificar nuvens.

Apesar dos cuidados para evitar a inclusão de nuvens, o algoritmo ainda pode incluir nuvens iluminadas durante o ciclo da lua cheia. Assim sendo, todas as detecções de luz coincidentes com nuvens identificadas no termal foram descartadas em noites que possuíam mais do que 50 % da irradiância máxima do ciclo de lua cheia.

A principal limitação das imagens do DMSP é, obviamente, sua resolução. Embora os dados possam teoricamente ser obtidos em alta resolução (0,56 km x 0,56 km), encontram-se disponíveis apenas com a resolução de 2,8 km x 2,8 km. Isto significa que as estimativas de área ocupada por objetos de alta radiância tendem a ser super estimadas.

Os dados sobre o incêndio em Roraima foram gerados pelo NGDC para cada noite entre 1 de janeiro e 31 de março de 1995 e 1998. Em 1998 os dados foram processados para observar os eventos extremos que culminaram com o incêndio florestal de Roraima. Os dados de 1995 foram processados para permitir a comparação entre o ano de 1998 e um ano típico de queimadas (Figura 20). Esta figura, associada às informações de campo produzidas pelo IBAMA e INPA, revela algumas tendências interessantes: (1) em 1995 a área total sujeita a focos de fogo nos meses de janeiro, fevereiro e março foi muito menor do que aquela de 1998; (2) em 1995 os focos de fogo ocorreram de forma esporádica em áreas de floresta, com sua maior incidência em formações savânicas; (3) em 1998 os focos ocorreram em maior número e com maior freqüência em áreas de savana, mas penetraram profundamente nas formações florestais a oeste do estado; e (4) em 1995 a persistência dos focos foi menor do que em 1998 , como se pode deduzir pelas amplas regiões de ocorrência das cores amarela , magenta e ciano.

Fig. - 20. Imagens do DMSP adquiridas no período de janeiro a março de 1995 e de 1998.

Os dados do DMSP foram processados para gerar dois produtos distintos: (1) contagem de focos, que representam o número de vezes que se detectou a presença de fogo em um dado pixel; e (2) nível digital acumulado, que representa a soma total dos níveis digitais para todos os focos detectados, fornecendo um indício da intensidade dos focos. Os arquivos disponíveis para análise são:

(1) Total de focos para cada um dos meses: janeiro, fevereiro e março de 1995 e de 1998. Os dados foram classificados em 4 classes, em função do número de focos a saber: 1; 2 a 3; 4 a 5; e 6 a 20. Esses dados permitem avaliar a persistência do fogo.

(2) Nível digital acumulado para os meses de janeiro, fevereiro e março de 1998: de 1 a 63; de 64 a 199; e de 200 a 600. Esses dados permitem avaliar a intensidade do fogo.

Apesar das limitações de resolução espacial, a disponibilidade diária de informações do DMSP permitiu realizar inferências sobre a persistência dos focos de incêndio em uma dada localidade, que podem ser associado aos diferentes graus de dano provocados pelo

fogo. Outra informação importante extraída dos dados do DMSP refere-se à distribuição espacial dos focos de incêndio ao longo da estação seca, e a confirmação da região crítica já previamente determinada em trabalhos anteriores (Barbosa, 1998).

3. RESULTADOS

3.1 – Integração de Dados de Sensoriamento Remoto e de Campo

Os dados disponíveis do TM-Landsat foram integrados aos dados e informações de campo coletados durante e pós o incêndio, para avaliar sua capacidade de identificar áreas afetadas pelo fogo. A Figura 21 apresenta a superposição dos focos identificados até 19 de março (demarcados em amarelo), conforme relatório da Brigada de Infantaria da Selva (Carvalho, 1998) sobre o mosaico de cenas TM-Landsat adquiridas em 11 de março (232/58 e 232/57) e 19 de março (233/58) de 1998. Os diâmetros variáveis dos círculos amarelos referem-se à uma avaliação qualitativa (por observação aérea) da intensidade e dimensão dos focos de fogo.

A Figura 21 mostra que: (1) a maior parte da área recoberta pelas três cenas TM-Landsat é composta por formações savânicas, as quais já não apresentavam focos de incêndio em março; (2) os sinais de queimadas nas formações savânicas são muito tênues, quando comparados àqueles em formações florestais, o que representa uma restrição ao uso das imagens TM-Landsat para a estimativa da área afetada pelo fogo; e (3) aproximadamente 70% dos focos de incêndio em área de floresta (14 dos 20 mapeados) concentram-se em uma única cena TM-Landsat (232/58). É importante ressaltar, entretanto, que os focos identificados pela Brigada de Infantaria da Selva correspondem apenas às áreas de fogo ativo, não incluindo, portanto, áreas em que o fogo já se extinguira na data de aquisição das imagens TM-Landsat.

Fig. 21 – Superposição dos focos de fogo (círculos amarelos) reportados pela Brigada de Infantaria da Selva, sobre uma composição colorida TM3(B) TM4(G) TM5 (R) de imagens adquiridas em 11 e 19 de março de 1998.

A Figura 22 mostra a distribuição dos polígonos afetados pelo incêndio em Roraima conforme coordenadas geográficas fornecidas por Barbosa (1998). Os polígonos verde (Bloco III) e azul claro (Bloco I) encontram-se parcialmente incluídos na cena 232/58. O polígono azul escuro(Bloco II) é o que está melhor representado na cena 232/58, conforme pode ser observado na ampliação, onde aparece sobreposto ao mosaico das imagens TM-Landsat de 11 e 19 de março de 1998. Pode-se observar, na ampliação da figura, que praticamente todo Bloco I encontra-se fora da melhor cena disponível para estimar a área queimada até março de 1998. As imagens TM-Landsat disponíveis até março recobriam apenas 70% da área afetada pelo incêndio florestal de Roraima, considerando-se os limites dos blocos mapeados por Barbosa (1998).

Fig. 22 – Polígonos contendo sinais de incêndio em maio/1998 e sua posição sobre as imagens TM-Landsat que recobrem a região norte de Roraima (232/57; 232/58; e 233/58). Na ampliação, apresenta-se a localização dos polígonos sobre a composição colorida TM3(B) TM4(G) TM5 (R) das cenas obtidas até março de 1998.

O fato de existir dados processados do satélite DMSP de janeiro a março de 1998 tornou possível verificar a consistência dos mesmos frente aos dados reportados por Carvalho (1998) e Barbosa (1998). A Figura 23 mostra a superposição das informações de campo e dos dados do DMSP referentes a janeiro, fevereiro e março sobre a composição colorida TM-Landsat. Os círculos brancos representam os focos de fogo em março, enquanto os róseos delimitam a área que apresentou cicatrizes de incêndio em maio segundo as informações de campo. Os polígonos representados em amarelo, azul e vermelho indicam as áreas onde os focos de fogo detectados pelo DMSP persistiram por mais do que cinco dias durante os meses de janeiro, fevereiro e março, respectivamente. Observa-se, na figura, que os focos de fogo na região de savana, com persistência superior a 5 dias, ocorrem em pequeno número e ocupam área reduzida, geralmente associada aos capões de mata. A baixa persistência de focos de fogo em áreas de savana era esperada, tendo em vista o baixo volume de material combustível neste tipo de ecossistema.

Fig. 23 – Superposição das informações de campo (círculos róseo) e dos dados do satélite DMSP (polígonos amarelos-janeiro, azuis-fevereiro e vermelhos-março) sobre a composição colorida TM-Landsat.

Observa-se ainda na Figura 23, que há concordância entre as áreas de alteração espectral da vegetação identificadas nas imagens TM-Landsat e as áreas com persistência de focos superior a 5 dias, no mês de fevereiro. Nota-se que a frente de fogo avançou prioritariamente na direção oeste, entre os meses de fevereiro e março. Verifica-se que em algumas regiões à leste do rio Branco, contrariamente à tendência geral de propagação do fogo da savana para a floresta, ocorreram significativos focos de fogo com persistência superior a 5 dias no mês de março. Isto é resultado da prática tradicional de derrubada e queima em áreas florestais e de renovação de pastagens, que continuou a ser exercitada na região, apesar do fogo atingir proporções fora de controle. Outra constatação interessante refere-se à concordância entre os limites da área que apresentou sinais de incêndio (identificada em campo) e as áreas que apresentaram persistência de focos de fogo superior a 5 dias, informação extraída das imagens do DMSP (Figura 23).

Várias constatações importantes foram derivadas das imagens do DMSP: (1)

existência de áreas submetidas a focos de fogo com persistência superior a 5 dias não contempladas totalmente por Barbosa (1998); (2) existência de numerosos focos de fogo em áreas onde as imagens TM-Landsat apresentaram cobertura de nuvens; (3) existência de focos de fogo onde a imagem de 11 de março não apresentou sinais de incêndio. Estas constatações indicaram a necessidade de uma cobertura mais completa de imagens TM-Landsat sobre a região, visando gerar uma estimativa mais exata e precisa da área florestal afetada pelo fogo.

3.2 – Comparação entre os dados TM-Landsat e de Videografia para a Área Piloto

A Figura 24 apresenta a superposição dos seguintes dados: composição colorida TM-Landsat (em verde); dados do DMSP (representando a densidade acumulada dos focos de fogo) (em vermelho); e faixas videografadas (em rosa). A figura apresenta também os limites da área piloto (em branco) e do polígono (em azul) correspondendo ao Bloco II identificado por Barbosa (1998).

Fig. 24 – Superposição da área piloto (delimitada em branco) e do polígono afetado pelo incêndio (delimitado em azul) sobre o mosaico das cenas TM-Landsat (verde), os dados do DMSP (vermelho) e o mosaico das faixas videografadas (rosa).

A Figura 24 mostra que a área piloto encontra-se inserida na região de maior incidência de fogo. Coincide também com a área que apresentou padrão espectral de

incêndio florestal na imagem TM-Landsat de 11 de março de 1998.

A Tabela 6 resume as premissas iniciais utilizadas na comparação entre os resultados da análise de dados videográficos e de dados TM-Landsat para a área piloto.

TABELA 6 – PREMISSAS ADOTADAS PARA COMPARAR AS ESTIMATIVAS OBTIDAS ATRAVÉS DOS DADOS VIDEOGRÁFICOS E DAS IMAGENS TM-LANDSAT NA ÁREA PILOTO

Resolução média dos pixels das diferentes faixas	1,4 x 1,1 m
Tamanho médio do pixel	1,52 m^2
Área imageada pelas 23 faixas que coincidem com as imagens TM	1.150,00 km^2
Área imageada pelo satélite Landsat	1.305,36 km^2
% da área imageada pela videografia em relação à imagem TM	88,15%

Devido a alterações dos parâmetros de vôo, em decorrência da nebulosidade, um dos problemas enfrentados com as imagens de vídeo foi a falta de superposição entre as faixas imageadas. O espaçamento entre as faixas sobrevoadas não foi constante de um dia para o outro, e nem ao longo da faixa. Assim sendo, para se ter uma estimativa mais exata da área realmente recoberta, estimou-se o tamanho do pixel em cada faixa, assim como o tamanho médio dos pixels para todas elas. A estimativa da área imageada foi obtida a partir do número total de pixels, e representou 88,15% da área recoberta pela cena TM-Landsat 232/058 de março de 1998.

A estimativa da área ocupada por cada classe mapeada na videografia foi gerada a partir do número de pixels de cada classe. Os totais para cada classe (em km^2) e seus correspondentes percentuais (relativos à área total videografada) são apresentados na Tabela 7. De forma a igualar a área compreendida pela área piloto na imagem TM-Landsat e no mosaico videográfico, procedeu-se à uma interpolação linear das estimativas geradas com os dados videográficos, correspondentes a 88,15% da área total na imagem TM-Landsat. Assim sendo, entendeu-se o valor 954,78 km^2 na Tabela 7 (associado a Floresta Queimada) como correspondendo a 88,15% da área total de Floresta Queimada na área

piloto. Uma estimativa da área de Floresta Queimada nela contida totalizou 1083,10 km^2 (954,78/0,8815). Os resultados da extrapolação dos dados videográficos e os valores correspondentes obtidos a partir das imagens TM-Landsat são apresentados na Tabela 8.

TABELA 7 – ESTIMATIVA DAS ÁREAS OCUPADAS POR CADA CLASSE NO MOSAICO VIDEOGRÁFICO DA ÁREA PILOTO

Classe	Área (km^2)	Percentagem
Floresta Queimada	954,78	82,98
Não Floresta Queimada	104,65	9,11
Floresta Não Queimada	24,80	2,16
Não Floresta Não Queimada	3,51	0,30
Água (rios e lagos)	9,52	0,82
Nuvem e Sombra	52,74	4,63
TOTAL	1.150,00	100,00

Observa-se, na Tabela 8, que a área coberta por Nuvens e Sombra de Nuvens na imagem TM-Landsat é bem mais elevada do que na videografia. Isto pode explicar, em parte, as diferenças observadas nos percentuais de área de Floresta Queimada nas imagens TM-Landsat e na videografia (65,79% e 82,98%, respectivamente). A análise das imagens TM-Landsat indicaram que grande parte da área recoberta por nuvem encontrava-se no domínio de florestas. A simples inclusão da área recoberta por nuvens à classe Floresta Queimada, entretanto, poderia sugerir tendenciosidade na produção dos resultados. Assim sendo, optou-se por distribuir a área sob Nuvem/Sombra entre as diferentes classes imageadas, mantendo os percentuais individuais de cada classe. Desta forma, descontando-se dos 1.305,36 km^2 a área sob Nuvem/Sombra (59,86 km^2), encontrou-se os seguintes percentuais para as classes estudadas: Floresta Queimada (1083,77/1245,50=0,8701 ou 87,01%); Não Floresta Queimada (118,79/1245,50=0,0954 ou 9,54%); Floresta Não Queimada (28,15/1245,40=0,0226 ou 2,26%); Não Floresta Não Queimada (3,98/1245,50=0,0032 ou 0,32%); Água (10,81/1245,50=0,0087 ou 0,87%). Esses percentuais foram utilizados para distribuir a área sob Nuvem/Sombra, de 59,86 km^2, entre

as classes estudadas, gerando os valores apresentados na Tabela 9. O mesmo raciocínio foi empregado para atualizar os dados TM-Landsat.

TABELA 8 – ESTIMATIVAS DE ÁREA OCUPADA POR CADA CLASSE MAPEADA UTILIZANDO DADOS TM-LANDSAT E DADOS VIDEOGRÁFICOS (ÁREA TOTAL EQUIVALENTE), NA ÁREA PILOTO

Classes	Videografia		Imagens TM-Landsat	
	Área (km^2)	Percentagem	Área (km^2)	Percentagem
Floresta Queimada	1.083,77	82,98	858,85	65,79
Não Floresta Queimada	118,79	9,11	124,02	9,50
Floresta Não Queimada	28,15	2,16	67,23	5,15
Não Floresta Não Queimada	3,98	0,30	0,96	0,08
Água (rios e lagos)	10,81	0,82	35,70	2,74
Nuvem e Sombra de Nuvens	59,86	4,63	218,60	16,74
TOTAL	1.305,36	100,00	1.305,36	100,00

TABELA 9 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA TOTAL IMAGEADA NA VIDEOGRAFIA E NAS IMAGENS TM-LANDSAT DAS DIFERENTES CLASSES ESTUDADAS, DESCONSIDERANDO-SE A CLASSE NUVEM E SOMBRA DE NUVEM, NA ÁREA PILOTO (ÁREA TOTAL EQUIVALENTE).

Classes	Videografia		Imagens TM-Landsat	
	Área (km^2)	Percentagem	Área (km^2)	Percentagem
Floresta Queimada	1.135,79	87,01	1.031,46	79,02
Não Floresta Queimada	124,53	9,54	148,98	11,41
Floresta Não Queimada	29,50	2,26	80,79	6,19
Não Floresta Não Queimada	4,18	0,32	1,17	0,09
Água (rios e lagos)	11,36	0,87	42,96	3,29
TOTAL	1.305,36	100,00	1.305,36	100,00

Os dados apresentados na Tabela 9, após a exclusão da classe Nuvem e Sombra de Nuvem, mostram que os resultados da classificação das imagens videográficas e da imagem

TM-Landsat são muito semelhantes. A diferença de 8% verificada entre a área estimada de Floresta Queimada através das imagens TM-Landsat e das imagens videográficas pode estar associada a alguns fatores, dentre eles: (1) limitação dos critérios de correção para o efeito das nuvens; (2) diferença nas datas de aquisição das imagens TM (20 dias antes do término do incêndio) e imagens videográficas (32 a 50 dias após extinção do incêndio); e (3) incapacidade do sistema TM-Landsat de detectar fogo de superfície onde o dossel se apresentava apenas parcialmente carbonizado. A justificativa (2) é a menos provável, uma vez que a área piloto foi atingida pelo fogo no mês de fevereiro (Figura 24). A partir da análise dos dados TM-Landsat e videográficos, concluiu-se que os dados deste satélite poderiam ser utilizados para avaliar a área de floresta afetada pelo fogo, antecipando-se uma pequena margem de erro em relação aos dados da videografia digital.

A Figura 25 mostra o resultado da interpretação dos dados de videografia na área piloto. Pode-se observar que, com exceção de uma mancha mais extensa de Floresta Não Queimada junto ao vale do rio Mucajaí, o restante da área foi severamente atingida pelo fogo, a ponto de ser incluída na classe Floresta Queimada. Os dados do DMSP sobre esta região (Figura 26) indicam a não existência de focos de fogo em fevereiro, e que em março, ocorreram focos com persistência de apenas um dia, não caracterizando, portanto, uma condição de incêndio florestal (queima persistente da biomassa abundante). Na Figura 26, as cores verde e vermelha estão associadas à presença de focos de fogo em fevereiro e março respectivamente. As faixas do mosaico videográfico estão representadas sobre as imagens do DMSP. A seta branca mostra o cursor sobre a área de Floresta Não Queimada, associada ao Nível Digital 70 (*Image Plane* 2). Este pixel encontra-se associado ao Nível Digital 1 (*Image Plane* 4) que corresponde ao número de dias de persistência de fogo em fevereiro, e ao Nível Digital 2 (*Image Plane* 3) que corresponde ao número de dias de persistência de fogo em março.

Fig. 25 – Mosaico videográfico interpretado da área piloto.

Fig. 26 – Superposição do mosaico videográfico nas imagens do DMSP.

O gráfico da Figura 27 mostra a distribuição das classes mapeadas em função da longitude das 23 faixas videografadas, na área piloto. Pode-se observar as seguintes tendências: (1) em praticamente todas as faixas ocorre a classe Não Floresta Queimada (NFQ) , correspondente às áreas antropizadas, indicando a importância da ocupação humana como fator que desencadeou o incêndio florestal em Roraima; e (2) a área de Floresta Não Queimada (FNQ) é pequena em todas as faixas imageadas, indicando que o incêndio, uma vez desencadeado, atingiu praticamente a totalidade do material combustível.

Fig. 27 – Distribuição longitudinal das classes mapeada.

A Figura 27 mostra também que praticamente toda a área de ocupação humana encontra-se queimada, corroborando as conclusões de Barbosa (1998), segundo o qual *"o crescimento desordenado de assentamentos humanos, espontâneos ou dirigidos na região foi o que provocou a quase totalidade dos incêndios em florestas intactas."*

Segundo Negreiros et al. (1996), os incêndios em floresta são condicionados pelo potencial de inflamabilidade e pelo potencial de ignição de uma dada região. O potencial de inflamabilidade depende das características ecológicas da área, e é condicionado por variáveis tais como: a estrutura da vegetação, condições hidrológicas da floresta etc. O potencial de ignição, por sua vez, está associado aos padrões de uso e ocupação do solo. Em anos secos como os do El Niño, a floresta pode sofrer deficiência hídrica e aumentar o

seu potencial de inflamabilidade. Entretanto, em condições naturais, só sofrerá um incêndio se houver uma fonte de ignição que em geral, na região, é causado pela ocupação humana.

A Figura 27, derivada dos dados de videografia, sugere, portanto, que as condições de ignição que desencadearam o incêndio florestal em Roraima tiveram sua origem nas práticas agrícolas regionais.

O nível de destruição da floresta foi, entretanto, bastante diferenciado, havendo tanto áreas em que a destruição atingiu extensas porções do dossel quanto áreas em que o fogo atingiu apenas algumas árvores. A Figura 28 exemplifica a ocorrência de fogo de dossel associado aos focos de fogo com persistência superior a 5 dias na faixa 26 do mosaico da área piloto. Esta faixa está incluída na cena TM-Landsat 233/58, que apresentou densa cobertura de nuvens por ocasião da passagem do satélite. Caso houvesse coincidência, entretanto, os dados não registrariam danos na floresta, visto que a superposição das imagens de vídeo com os dados do DMSP revelam que esta região só foi afetada pelo fogo em março. Nesta figura pode-se observar, na faixa mapeada, as características da área queimada registradas na imagem de vídeo e o número de dias de persistência do fogo em março de 1998.

Fig. 28 –Superposição das imagens videográficas nas imagens do DMSP, mostrando floresta com crestamento foliar associada aos focos de fogo com persistência superior a 5 dias, no mês de março.

3.3 – Avaliação da área de Floresta Queimada através de imagens TM-Landsat

A utilização das imagens TM-Landsat como fonte principal para gerar as estimativas da área afetada pelo fogo foi motivada pela concordância verificada entre os dados videográficos classificados na área piloto e a classificação da área correspondente na imagem TM-Landsat, conforme resultados apresentados na Tabela 9. Tendo em vista esta concordância, as cenas disponíveis no formato digital foram processadas utilizando o modelo de mistura, enquanto as disponíveis em formato analógico foram submetidas à interpretação visual, conforme ilustrado na Figura 29.

Fig. 29 – Posição das imagens TM-Landsat utilizadas (A- analógicas; D- digitais) na estimativa de área de Floresta Queimada, superposta às imagens do DMSP.

A imagem 232/58 de 11 de março de 1998 foi submetida a um método de classificação que permite editar as classes de legenda em função do conhecimento *a priori* da área. Esta classificação discriminou as seguintes classes: Floresta Queimada, Floresta

Parcialmente Queimada e Floresta Não Queimada. As demais classes (Não Floresta Queimada, Nuvens/Sombras e Água) foram incluídas na categoria Outros, conforme indicado na Figura 30. Os resultados dessa classificação encontram-se resumidos na Tabela 10.

Fig. 30 – Classificação da imagem TM-Landsat 232/58: verde escuro: Floresta Queimada; verde médio: Floresta Parcialmente Queimada; verde claro: Floresta Não Queimada; Outros: ocre.

TABELA 10 - ESTIMATIVA DA ÁREA DE FLORESTA ATINGIDA PELO INCÊNDIO EM RORAIMA A PARTIR DA ANÁLISE CONJUNTA DAS IMAGENS TM-LANDSAT DE 1997 E 1998, REFERENTES À CENA 232/58

Classe	**Área** (km^2)	**Percentagem** em relação ao Total	**Percentagem** em relação ao Total de Floresta
Floresta Queimada	4.484,80	14,26	33,9
Floresta Parcialmente Queimada	4.305,89	13,69	32,56
Floresta Não Queimada	4.435,22	14,10	33,53
TOTAL DE FLORESTA	13.225,91	42,04	100
Outros (Água, Não Floresta)	15.400,08	48,95	-
Nuvem/Sombra	2. 835,00	9,00	-
TOTAL	31.460,99	100,00	-

A análise da Figura 30 indica que 33,9% (4 484,80 km^2) do total de floresta existente na imagem 232/58 de 11 de março de 1998 (13.225,91 km^2) foi severamente afetada pelo fogo, com significativa queima de dossel.

Pode-se observar uma excelente associação entre a área classificada como Floresta Queimada e a presença de focos de fogo com persistência superior a 5 dias (Figura 31). A comparação entre as Figuras 30 e 31 revela que toda a área classificada como Floresta Queimada na imagem TM-Landsat 232/58 está encoberta predominantemente pela cores amarela, azul ou vermelha, associadas aos focos de fogo com persistência superior a cinco dias em janeiro, fevereiro e março, respectivamente.

Fig. 31 – Superposição da imagem TM/Landsat classificada com dados do DMSP. Os polígonos amarelos, azuis e vermelhos indicam focos de fogo com persistência superior a 5 dias em janeiro, fevereiro e março, respectivamente.

Nota-se, na Figura 31, que o fogo na região de Apiaú (uma das mais intensamente afetadas pelo incêndio) iniciou em janeiro, propagando-se a leste, sudeste, norte, noroeste e oeste. Ao sul, em direção ao vale do rio Catrimani, os focos de fogo com alta persistência ocorreram esporadicamente, indicando um menor grau de comprometimento da floresta. De fato, a avaliação da área de Floresta Queimada ao sul de Apiaú (prioridade 4 - Região de Caracaraí) no mosaico das faixas amostrais indica que a percentagem de área afetada é proporcionalmente menor (Figura 32). De uma área total de 83,66 km^2 amostrada nessa região, apenas 41% foi classificada como Floresta Queimada. Na área piloto, este percentual atingiu 87%. (Tabela 9).

Estes dados sugerem que realmente existe uma forte associação entre a persistência do fogo, registrada pelos dados do DMSP, e o grau de comprometimento da floresta. Nas áreas onde o DMSP registrou focos com persistência superior a 5 dias (em janeiro, fevereiro ou março), a área de floresta atingida pelo fogo totalizou percentuais superiores a

78% na região amostrada. Naquelas onde o DMSP registrou focos com persistência inferior a 5 dias (mais especificamente, entre 2 e 4 dias), indica que o impacto sobre a floresta foi bem menor.

Fig. 32 – Posição das faixas amostrais, suas respectivas prioridades de imageamento e percentuais de cobertura vegetal afetada pelo incêndio florestal em Roraima.

A Figura 32 mostra que nas áreas não abrangidas pela cena 232/58, houve incidência considerável de áreas florestais afetadas pelo fogo, embora em menor proporção. A Tabela 11 fornece as estimativas das áreas afetadas pelo fogo, geradas a partir da interpretação das faixas amostrais videografadas, segundo as prioridades de aquisição.

A Tabela 11 indica que dos 745,60 km^2 videografados, cerca de 36% (269,86 km^2) correspondem à classe Floresta Queimada. É interessante notar que nas áreas amostradas com predominância de formações florestais (PRIO-1 e PRIO-4), este percentual atingiu cerca de 52%. Estes dados confirmam, mais uma vez, que os focos de fogo mapeados pelas imagens do DMSP são um excelente indicador da presença de Floresta Queimada.

TABELA 11 – ESTIMATIVA DA ÁREA AFETADA PELO FOGO NAS FAIXAS VIDEOGRAFADAS

Faixa	FQ (km^2)	FNQ (km^2)	NFQ (km^2)	NFNQ (km^2)	Rio (km^2)	N/S (km^2)	NFI (km^2)	Total (km^2)
Prioridade 1	35,31	30,63	11,82	1,28	1,60	3,02	0,00	83,67
Prioridade 2	46,18	28,31	28,74		0,90	8,74		230,87
Prioridade 3	21,00	37,03	49,02	7,19	3,33	1,78	43,38	162,71
Prioridade 4	167,37	45,11	42,20	2,91	1,96	8,79		268,35
Total	269,86	141,09	131,77	10,09	7,79	22,32	43,38	745,60

3.4 - Estimativa da área de cobertura florestal afetada pelo fogo

A partir da utilização das imagens TM–Landsat que recobriam as áreas de prioridade definidas em Barbosa (1998) e corroboradas pelas análise de imagens do DMSP e de videografia amostral, foi estimada a área total de Floresta Queimada no estado de Roraima. Quando se procede a uma avaliação da área de Floresta Queimada através de dados TM-Landsat , o conceito equivalente ao de Floresta Líquida Queimada de Barbosa (1998), é o de "cobertura florestal afetada pelo fogo", uma vez que suas limitações de resolução espacial e temporal não permitem a determinação de um fator de queima.

A Tabela 12 resume os resultados e permite sua comparação com os dados estimados em campo por Barbosa (1998). Estes valores correspondem à área classificada por este autor como Floresta Líquida Queimada, ou seja, Floresta sujeita a diferentes fatores de queima. A diferença de 11,52 % identificada nas imagens TM- Landsat pode estar associada a alguns fatores: (1) parte das imagens utilizadas foram adquiridas três meses após do incêndio comprometendo o mapeamento de áreas sujeitas a baixo impacto do fogo, principalmente através de análise visual; e (2) a não inclusão da classe Parcialmente Queimada e/ou em vias de recuperação do dossel na estimativa de Floresta Queimada.

TABELA 12 – ESTIMATIVA DA ÁREA DE FLORESTA QUEIMADA NO ESTADO DE RORAIMA A PARTIR DA INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS TM-LANDSAT, COMPARADAS ÀS ESTIMATIVAS DE CAMPO FORNECIDAS POR BARBOSA (1998)

Classe Mapeada	**TM-Landsat (km^2)**	**Campo (km^2) [a]** Barbosa (1998)	**Diferença (%)**
Floresta Queimada	11 620,53	13 134,50	-11,52 %

[a] Área Líquida Atingida, conforme definição de Barbosa (1998)

Na Tabela 13 apresentam-se as estimativas de área florestal afetada pelo incêndio em Roraima obtidas a partir das diversas abordagens testadas no decorrer desta pesquisa. Como pode ser observado os resultados são bastante consistentes independentemente da metodologia adotada.

TABELA 13 - ESTIMATIVAS DE ÁREA DE COBERTURA FLORESTAL AFETADA PELO INCÊNDIO EM RORAIMA A PARTIR DE DIFERENTES METODOLOGIAS

Fonte da Estimativa	**Floresta Afetada pelo Incêndio**
TM-Landsat / Interpretação de 5 cenas submetidas a interpretação visual e digital	11.620,53 km^2
TM-Landsat / Interpretação Digital da cena de 11 de março e extrapolação para os blocos de queima- Floresta Queimada e Parcialmente Queimada	11.768,39 km^2 **a**
TM-Landsat / Interpretação Digital da cena de 11 de março e extrapolação para os blocos de queima. Floresta Queimada.	6.036,35 km^2 **b**
Área do estado de Roraima sob focos de incêndio com persistência superior a 5 dias em janeiro, fevereiro e março	6.843,52 km^2 **c**

(a) Este valor é equivalente à Área Líquida de Floresta Queimada em Barbosa (1998) . Foi obtido calculando-se a proporção de Floresta Queimada + Floresta Parcialmente Queimada em relação à área total de Floresta existente

na cena 232/58 (8 790,69 km²/13 225 km²=0,66). Esta proporção foi então extrapolada para a área total dos Blocos de Queima I, II e III mapeados por Barbosa (1998) e estimada em 16.487,4 km² (16.487,4 km² x 0,66=10.896,66). Este valor foi corrigido com o auxílio das imagens videográficas, obtidas entre 2 e 18 de maio de 198, admitindo-se que entre 11 de março e 31 de março houve um incremento de área queimada (estimado na área piloto) de 8% (10.896,66 x 1,08=11.768,39 km²);

(b) esta estimativa é equivalente à Área Queimada Real, definida em Barbosa (1998) como a área líquida ponderada por um certo fator de queima. Foi obtido calculando-se a proporção de Floresta Queimada em relação à área total de Floresta existente na cena 232/58 (4.484,80 km²/13.225 km²=0,339). Esta proporção foi então extrapolada para a área dos Blocos de Queima I, II e III de Barbosa (1998) e estimada em 16.487,4 km² (16.487,4 km² x 0,339=5.589,22 km²). Este valor foi corrigido com o auxílio das imagens videográficas, admitindo-se que entre 11 de março e 31 de março houve um incremento de área queimada (estimado na área piloto) de 8 % (5.589,22 km² x 1,08=6.036,35 km²);

(c) esta estimativa corresponde à Área Queimada Real, uma vez que foi constatada a correlação espacial entre focos de alta persistência e fogo de dossel. Foi estimado a partir de dados do satélite DMSP. Como o sistema é de baixa resolução, não sendo, portanto, adequado para o cálculo de área, estimou-se a proporção de pixels sujeitos a focos de incêndio com persistência superior a cinco dias em relação ao número total de pixels existentes no estado de Roraima. Essa proporção foi calculada em 3,04% e aplicada à área do estado de Roraima (225.116,1 km² x 0,0304=6.843 km²).

A Tabela 14 permite a comparação entre os diversos resultados derivados de sensores remotos e do relatório de Barbosa (1998) em termos percentuais.

TABELA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ESTIMATIVAS DO PERCENTUAL DE ÁREA DE FLORESTA AFETADA PELO INCÊNDIO EM RORAIMA.

Tipo de Efeito sobre a Floresta	**Barbosa/ 5 cenas TM (digital + visual)**	**TM 5 cenas/TM 1 cena**	**Barbosa/ TM Digital (1 cena)**	**TM (1 cena)/ DMSP**	**Barbosa/ DMSP**
Área líquida de Floresta Queimada	+ 11,5 %	1,25 %	+10,4 %		
Área Queimada Real			+ 15, 7 %	-11,79 %	+ 4,00 %

A análise da Tabela 14 demonstra que as diferenças de estimativas de área afetada pelo fogo usando as múltiplas fontes de dados existentes se mostraram bastante similares entre si, e se aproximaram também das estimativas realizadas com intenso trabalho de campo. Em média, as estimativas realizadas por Barbosa (1998) excedem àquelas avaliadas através de imagens de satélite, mas estas diferenças encontram-se dentro da margem de erro esperada tendo em vista as inúmeras variáveis a serem contornadas para a realização da estimativa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo central do projeto, ou seja, a estimativa da área florestal queimada durante o incêndio de 1998 em Roraima foi atingido (com sucesso) utilizando dados multisensores. Os dados do DMSP foram fundamentais para confirmar a existência de extensas áreas florestais atingidas pelo fogo após 11 de março de 1998, data para a qual se dispunha de dados TM-Landsat. A gravidade dos danos causados por estes fogos pôde ser avaliada a partir da análise da persistência dos focos e com o auxílio das imagens videográficas disponíveis em regiões não recobertas por imagens TM-Landsat livres de cobertura de nuvens. Com isto, teve-se o cuidado de se obter cenas mais recentes que permitissem a avaliação dos sinais remanescentes de incêndio florestal.

Esses sinais eram inequívocos para a categoria Floresta Queimada. Outras classes inicialmente avaliadas não puderam ter suas estimativas de área extrapoladas para todo o estado. Esses dados, entretanto, existem para a cena 232/58, e serão oportunamente divulgados.

Em termos de desenvolvimento metodológico, a videografia digital demonstrou ser uma fonte importante de dados e permitiu confirmar as indicações de queima de dossel identificadas em imagens TM-Landsat.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, R. I. Avaliação da área dos sistemas naturais e agroecossistemas atingida pelo fogo no Estado de Roraima (01.12.1997 a 30.04.1998). INPA/ Roraima, Boa Vista, maio, 1998.

Barbosa, R.I.; Ferreira, E.J.G; Castellón, E.G. **Homem, Ambiente e Ecologia no Estado de Roraima**. INPA, Manaus, 1997.

Carvalho, L.E.M. Relatório da Brigada de Infantaria da Selva, sobre as operações de combate ao incêndio em Roraima. Excerto enviado em comunicação pessoal. 3p. 1998.

CPTEC **Boletim Especial sobre os Impactos do El Niño 97/98**. Disponível no CPTEC. Cachoeira Paulista, Dez, 1997.

IBAMA MMA **RORAIMA. Avaliação de Impacto Ambiental,** 1998.

Lima, A.A.D. Relatório sobre a palestra realizada pelo Chefe da equipe da UNDAC sobre o incêndio florestal em Roraima. Comunicação pessoal ao MCT. 3p. 1998.

Negreiros, G.H., Nepstad, D.C; Sandberg, D. ; Alvarado, E.; Hinckley, T.; Pereira, M. **Fire along the Transition between the Amazon Forest and the Cerrado Ecosystem.** Artigo apresentado na *13th Conference on Fire and Forest Meteorology*, 27-31 de Outubro, 1996, Lorne, Austrália.

EASI/PACE. **Using PCI Software**. Ontário, Canadá, Oct. 1993.

Richards, J.A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**: **An Introduction**. New York , Springer-Verlag, 1993.

Santos, J.R. **Projeto Biomass: Sensoriamento remoto para a análise integrada da vegetação com elementos do meio físico e distribuição de fitomassa em áreas de contato de floresta e os campos de Roraima.** Divisão de Sensoriamento Remoto/INPE. São José dos Campos. Pesquisa apoiada pela FAPESP, processo 1997/0943-8, São José dos Campos, 1998.

Schaefer, C.E.R. Ecogeography and human scenario in northeast Roraima, Brazil. *Ciência e Cultura*, **Journal of the Brazilian Association for Advancement of Science. 49** (4):241-252, 1997.

APÊNDICE A

REGIÕES MAIS AFETADAS PELO FOGO (ADAPATADA DO RELATÓRIO DA BRIGADA DE INFANTARIA, CARVALHO, 1998)

REGIÃO	COORDENADAS DOS SPOTS	OBSERVAÇÕES
MARACÁ	N03°27´54 ”/ W 61° 33´ 31” N03°27´05 ”/ W 61° 40´ 32” N03°32´07 ”/ W 61° 39´ 50” N03°28´61”/ W 61° 42´ 13” N03°25´05 ”/ W 61° 33´ 31”	Diversos focos de propagação rasteira em direção oeste, em regiões de campos abertos. Alguns focos em áreas de vegetação densa, com presença de combustão de algumas árvores. Vegetação no interior da Estação Ecológica de Maraá está sem folhas, o que pode aumentar o poder de propagação e combustão do fogo.
CARACARAÍ E ADJACÊNCIAS	N01°43´00 ”/ W 61° 10´ 00” N01°58´18 ”/ W 61° 10´ 10” N01°51´53 ”/ W 61° 04´ 41” N01°49´06 ”/ W 61° 07´ 07” N01°40´00 ”/ W 61° 13´ 00” N02° 02´00” /W 61° 19´ 00”	Grandes queimadas provocadas por derrubadas, com propagação através de diversos focos em mata fechada e áreas de campo. Dezenas de focos com formação de extensas nuvens de fumaça. Desmatamentos em fazendas, com grandes frentes de fogo próximo ao Rio Branco, e entre Rio Branco e a BR 210. Grandes frentes junto ao entroncamento da BR 174 e 210. Em muitos pontos os focos avançavam pela mata fechada. Diversos focos em área de floresta densa.
NIQUIÁ PARQUE NACIONAL VIRUA E ADJACÊNCIAS	N01°32´00 ”/ W 61° 16´ 00” N01°29´04 ”/ W 61° 26´ 42” N00° 55´26” /W61° 25´21” N01° 06’42”/W61° 22´21” N00° 48´55”/W61°39´04”	Cinco focos pequenos em vegetação densa com frente de propagação de aproximadamente 10 km. Focos próximos a Rio Branco, em vegetação densa. Incêndio provocado dentro da estação ecológica, com frente de 2 km, avançando em direção N/NE.
COLÔNIA APIAU		Florestas e pastagens. Fogo de superfície na floresta. Toda a vegetação rasteira atingida pelo fogo. Nos pastos a velocidade de propagação é maior do que na floresta.
TRAIRÃO/TEPEQUÉM	N03° 43´05”/W61°43´53” N03° 36´02”/W61°43´14” N03° 40´04”/W61°43´23”	Focos se propagando em direção oeste, tendendo a atingir a região nordeste da Reserva Yanomami em áreas de floresta fechada. Fogo se propaga com uma frente larga.

RESERVA YANOMAMI		Região coberta por florestas. Ocorrência de fogo de superfície.
ALTO ALEGRE	N03° 19´24"/W61°27´08" N03° 14´08"/W61°33´55" N02° 53´43"/W61°28´10" N02° 49´18"/W61°24´36"	Dezenas de focos em vegetação densa próximos ao acesso a Estação Ecológica, vicinal do Rio Mucajaí, e margens do Rio Mucajaí.
Município de Mucajaí	N02° 42´07"/W61°24´12" N02° 37´57"/W60°47´34" N02° 36´20"/W61°22´10" N02° 32´56"/W61°21´08" N02° 28´54"/W61°51´08" N02° 30´47"/W61°51´08" N02° 25´01"/W61°18´05" N02° 19´05"/W60° 54´13" N02° 15´10"/W60°55´52"	Extensas áreas queimadas com presença de dezenas de frentes de fogo, diversas áreas sem acesso em vegetação densa. 1) Desmatamento grande com queimadas diversas e vários focos pequenos. 2) Apresenta um foco grande e diversos focos pequenos próximos à estrada. Muita rocas queimada entre os focos. 3) Diversas roças queimadas e focos disseminados. 4) Espessa nuvem de fumaça, uma centena de focos. 5) Focos intensos na região serrana. 6) 10 a 15 focos de fogo. 7) Grande desmatamento à margem direita do Rio Branco, com pequenos focos.
Região de Iracema	N02° 10´15"/W60°58´47" N02° 03´42"/W61°11´06" N02° 01´19"/W61°01´22"	1) Desmatamento de cerca de 1,5 Km nas margens do Rio Branco e pequenos focos de incêndio generalizado. 2) Entre as duas coordenadas havia 50 focos de incêndio em áreas de vegetação densa.

FONTE: Carvalho, L.E. Maia – Relatório da Brigada de Infantaria da Selva, Boa Vista, Roraima, 1998.

APÊNDICE B

CARACTERIZAÇÃO DO DMSP

Uma breve história do *Defense Meteorological Satellite*

A sigla DMSP é o acrônimo de ***Defense Meteorological Satellite Program*** (Programa de Satélites Meteorológicos de Defesa), cujo primeiro satélite foi lançado em 1970, levando a bordo uma versão primitiva do atual sistema sensor, o OLS (*Operational Line Scan*). O primeiro OLS foi lançado em 1976 e desde então seu projeto sofreu poucas alterações. Atualmente, o programa opera três satélites: o F-13, em órbita descendente, o F-12 e o F-14 em órbita ascendente (recobrimento noturno). Há mais seis plataformas DMSP mantidas como reserva, para o caso de necessidade de substituição do sistema. Tendo em vista o desempenho atual do sistema, é previsto o fornecimento contínuo dos dados até entre os anos de 2015 e 2020. Os quatro últimos satélites do programa terão a bordo versões aperfeiçoadas do OSL, com duas bandas espectrais adicionais, centradas em 1,65 μm e 3,7μm. Em 1992, a *U.S. Air Force* (Força Aérea Americana) e a NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) organizaram um centro de dados DMSP junto ao NOAA *National Geophysical Data Center* (NGDC) localizado em Boulder, Colorado. Este centro recebe os dados DMSP através de um canal de transmissão dedicado à Offutt *Air Force Base* (Base Aérea de Offutt), em Omaha, Nebraska. Após uma ou duas horas da recepção dos dados, eles já se encontram disponíveis para análise no NGDC. Esses dados são acumulados por um dia no NGDC antes de serem processados.

Descrição do Satélite

O DMSP tipicamente recobre a superfície com dois satélites, um operando numa órbita ascendente, e outro na descendente. O satélite de órbita ascendente cruza o equador às 9:00 e as 21:00 horas (horário local). O DMSP opera um conjunto de satélites de órbita polar equipado com sensores meteorológicos. Estes sensores incluem três sistemas passivos de microondas (SSM/I, SSM/T1 e SSM/T2), sensores de bordo e um sensor imageador aperfeiçoado para a detecção de nuvens, conhecido como OLS (*Operational Linescan System*) que opera com duas bandas espectrais: **VIS** na região visível e

infravermelho próximo (0,4μm a 0,9μm) do espectro eletromagnético, e **TIR** na região do infravermelho termal (10 μm -13 μm). O OLS recobre, a cada varredura, uma faixa de aproximadamente 3.000 km, permitindo uma cobertura global do planeta quatro vezes ao dia: manhã, meio dia, entardecer, noite.

À noite, o sinal da banda visível é intensificado através de um tubo fotomultiplicador, o que torna possível a detecção de nuvens iluminadas apenas pela luz da Lua. Esta estratégia de imageamento apresenta bons resultados quando a irradiância encontra-se em um nível superior a 50 % do nível de iluminação verificado em condições de lua cheia. Durante o período de lua nova, as nuvens não são detectáveis mesmo quando o ganho é fixado nos seus mais altos níveis. Este sensor tem uma elevada sensibilidade radiométrica, o que lhe permite a detecção de radiâncias na banda VIS de intensidades tão pequenas quanto 10^{-9} watts cm^{-2} sr^{-1} μm^{-1} (Apêndice B). Esta elevada sensibilidade faz com que, além de nuvens, as imagens noturnas do canal VIS possam ser utilizadas para a detecção de luzes presentes na superfície terrestre provenientes de cidades, vilas, "*gas flare*", e eventos efêmeros tais como incêndios florestais etc.

A banda visível do OLS é ajustada automaticamente para o nível de iluminação lunar com o objetivo de gerar imagens de qualidade unifome para a interpretação visual dos padrões de nuvens. O ganho do detetor é ajustado ao seu nível mínimo durante a lua cheia, e aumenta gradualmente à medida que a iluminação lunar diminui. Os níveis máximos de ganho são obtidos durante a lua nova.

APÊNDICE C

MOSAICAGEM SEMI-AUTOMÁTICA DE IMAGENS DE VIDEOGRAFIA

Michael Steinmayer

Uma das características da videografia é a substituição de um único arquivo grande como no sensor TM-Landsat (aproximadamente 7000 x 7000 pixels) por uma série de imagens pequenas, que precisam ser devidamente registradas e mosaicadas. O processo de mosaicagem pode ser feito através de programas disponíveis no ENVI (*Environmental Visualizing Images*), quando o número de imagens é pequeno.

Tendo em vista a necessidade de se construir, neste estudo, um mosaico envolvendo cerca de 4000 cenas, optou-se por uma solução via software para acelerar esse processo de registro e mosaicagem, usando o programa ENVI (*Environment for Visualizing Images*).

Uma faixa de vôo segue tipicamente uma linha reta, resultando também numa seqüência de imagens capturadas que apresentam idealmente um deslocamento grande (*shift*) apenas no eixo y, e eventualmente um pequeno deslocamento (*drift*) em x. Duas imagens seqüenciais podem, portanto, ser registradas uma relativa à outra através do deslocamento (diferenças relativas das coordenadas) de um ponto comum às duas imagens, (área de superposição - *overlap*). Esta superposição pode ser definida com bastante precisão na captura das imagens de vídeo.

Pela programação dos vôos e a captura das imagens de vídeo, os dados foram disponibilizadas em lotes de 60 imagens, no formato .BMP (3 bandas R,G,B), no tamanho 640 x 480 pixels, definindo uma seqüência completa de vôo (de um ponto de retorno ao próximo). O fato dos arquivos serem capturados e numerados seqüencialmente facilitou o processamento automático de um lote inteiro.

O programa de assistência ao registro das imagens foi realizado dentro da plataforma ENVI, usando a linguagem de programação nativa do ENVI, o IDL (*Interactive Data Language*). Esta linguagem permite o desenvolvimento rápido de aplicações completas, e o fato do ENVI ter sido desenvolvido 100% nesta linguagem, possibilita a integração total de um programa escrito em IDL dentro do ambiente do ENVI.

Para o fácil acesso aos programas foi criada uma nova opção no menu principal do ENVI ("Roraima Especial"). Apesar de ter sido desenvolvido para a plataforma Windows 95-NT, o programa pode ser facilmente modificado para operar em plataformas *Macintosh* e *Unix*.

Sob o ponto de vista do usuário, a execução do programa é dividida em três etapas:

1. Cópia da próxima seqüência de imagens (e.g. 60 imagens) para um diretório vazio; e
2. Seleção no menu principal do ENVI "Ferramentas"-> "Roraima especial"→ " Definir Pontos de Controle". Abre-se um diálogo para a seleção da primeira imagem da seqüência

Abre-se a janela principal (Figura C1), visualizando as primeiras duas imagens em ordem vertical, junto com a interface do usuário. Como o avião operou no modo de varredura, existem duas possibilidades para a seqüência das imagens: Norte-Sul e Sul-Norte. Neste primeiro quadro o operador pode decidir que as imagens estão em ordem invertida, e reverter a ordem das imagens com a opção "Modo de operação", que recarrega as imagens na ordem desejada. Uma vez selecionada a direção certa, o operador identifica áreas comuns nas duas imagens e marca um ponto característico em cada uma das duas imagens com a tecla esquerda do ponteiro. As coordenadas dos pontos selecionados são, então, registradas no canto superior esquerdo da janela.O processo de seleção dos pontos de controle pode ser repetido quantas vezes for necessário.

Para facilitar a identificação das áreas comuns às duas imagens o programa aplica automaticamente um ajuste de realce (*Histogram Matching*) na faixa de superposição (aproximadamente de 60 pixels).

Fig. C1 - Processo de mosaicagem semi- automática.

O campo "Posição" indica as coordenadas absolutas da posição de cursor. Marcado corretamente o ponto de controle nas duas imagens, o operador parte para o próximo conjunto de imagens clicando no botão "ok/próximo", ou – para ser mais rápido – apertando a tecla de espaço. As coordenadas do ponto nas duas imagens estão sendo armazenadas, e a próxima dupla de imagens aparece na tela. Depois ter registrado a última dupla de imagens, o operador tem a opção de salvar os pontos de controle num arquivo ASCII, para finalizar esta sessão. O nome do arquivo é constituído dos primeiros 4 algoritmos do nome do lote, mais o *string* pts.txt (por exemplo: 0541pts.txt).

Com o arquivo dos pontos de controle é possível mapear um georreferenciamento "virtual" nas imagens do lote; o operador acessa esse mapeamento através da opção no menu "Ferramentas"→ "Roraima especial" → "Ajustar cabeçalhos e mosaicar" .

O programa pede o arquivo dos pontos de controle pts.txt, a seleção de uma das imagens no mesmo diretório, e oferece a definição das coordenadas Lat./Long. para um ponto a critério do operador. A estrutura simples e transparente de arquivos do formato ENVI (o cabeçalho da imagem é em formato ASCII) permite o referenciamento dentro de um lote de imagens, ajustando as coordenadas dos pontos de controle em pixels, às respectivas coordenadas geográficas. O resultado desta operação é a modificação dos cabeçalhos das imagens do lote, e a criação do arquivo *template.mos*, para a criação de um mosaico virtual.

A partir deste momento, o operador pode acessar o mosaico completo das 60 imagens com a opção do menu "Abrir"→ "Abrir arquivo do ENVI" e selecionando o arquivo TEMPLATE.MOS, que automaticamente disponibiliza as três bandas do mosaico virtual do lote de imagens na lista de bandas disponíveis do ENVI. Este mosaico foi então exportado em dois formatos: no formato ".pix" para que fosse submetido ao registro com os dados TM/Landsat 5; e no formato ".img" para ser paralelamente submetido a interpretação visual na tela.