

PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS
 AUTORES/AUTHORS: SENSORIAMENTO REMOTO, GEOLOGIA, COBERTURA VEGETAL E PROCESSAMENTO DE IMAGEM

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY
 RALF GIELOW
 Pres. Cons. Pós-Graduação

AUTOR RESPONSÁVEL
RESPONSIBLE AUTHOR
 Britaldo S. Soares Filho

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION
 INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR/REVISED BY
 Raimundo Almeida Filho

CDU/UDC
 528.711.7:551.4

DATA/DATE
 setembro/1990

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-5117-TDL/419
	CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA À UTILIZAÇÃO DE IMAGENS TM/LANDSAT-5 NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE REGIÕES COM SIGNIFICATIVA COBERTURA VEGETAL
AUTORES/AUTHORSHIP	Britaldo Silveira Soares Filho

ORIGEM
ORIGIN
 PG/DPA

PROJETO
PROJECT
 SER

Nº DE PAG.
NO OF PAGES
 150

ULTIMA PAG.
LAST PAGE
 131

VERSÃO
VERSION

Nº DE MAPAS
NO OF MAPS

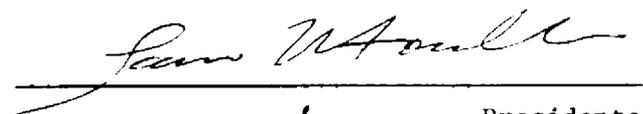
RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Este trabalho contribui para o desenvolvimento metodológico de aplicação de imagens TM/Landsat-5 no mapeamento geológico de semidetalhe de regiões com significativa cobertura vegetal, enfocando a análise da influência da vegetação nos conteúdos de informação global e geológica de imagens multiespectrais/multitemporais, selecionando a melhor época de aquisição de dados e dos tripletos de bandas potenciais à discriminação de solos e rochas e definindo uma seqüência de realces digitais. Selecionaram-se para o estudo três passagens do sensor TM/Landsat-5 nas datas de 13.9.85 - final da estação seca, 15.10.85 e 30.5.87 - início e final da estação de chuvas, respectivamente. Classes de solos e rochas, de vegetação verde e de mistura foram reconhecidas na imagem do canal H (matiz) gerado a partir da composição 4R5G3B, época seca. Os métodos de Sheffield (1985) e Chaves (1982) foram empregados para a seleção de bandas e análise de conteúdo de informação, utilizando os dados multitemporais e os dados das imagens da época seca com exclusões da classe vegetação e das classes vegetação mais mistura. Os atributos espaciais e espectrais foram tratados e analisados à parte. Para o realce dos atributos espaciais empregou-se a técnica de filtragem linear sobre a banda TM4 e a primeira componente principal. Técnicas de decorrelação e de razão de bandas foram escolhidas para o realce espectral. Por último, integraram-se ambos os atributos via técnicas de fusão IHS e composição híbrida. As exclusões das classes de vegetação e de mistura produziram um estiramento nos elipsóides de informação ao longo da linha

OBSERVAÇÕES/REMARKS
 Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações aprovada em 28.11.89.

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

Dr. Ícaro Vitorello



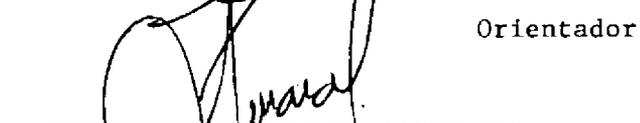
Presidente

Dr. Raimundo Almeida Filho



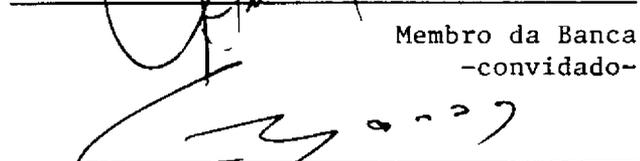
Orientador

Dr. Gilberto Amaral



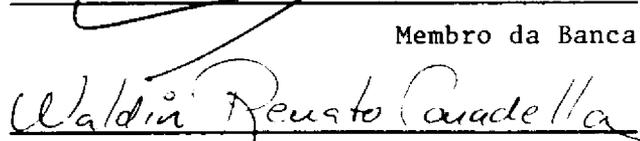
Membro da Banca
-convidado-

Dr. Gerald Jean Francis Banon



Membro da Banca

Dr. Waldir Renato Paradella



Membro da Banca

Candidato: Britaldo Silveira Soares

São José dos Campos, 28 de novembro de 1989

**Dedico aos meus pais,
Britaldo e Teresinha.**

AGRADECIMENTOS

A Raimundo Almeida Filho pela orientação, a todos do SERE que muito contribuíram para a minha formação acadêmica, aos membros do LTID que me auxiliaram, em especial a José Carlos Moreira, a todos da Biblioteca que ajudaram nas minhas pesquisas bibliográficas, às instituições que apoiaram este trabalho METAMIG, INPE, CNPQ e CAPES. Meus agradecimentos especiais aos meus colegas de pós-graduação pelo bom convívio e rica experiência conjunta, a Neuza Bicudo pela revisão de linguagem, a Fernando Ii pela ajuda computacional, aos colegas da METAMIG, Lauri Bez, João Carlos Christophe da Silva e Alex Vinicius Bernadi pelo incentivo e colaboração à elaboração deste trabalho, a Maria do Carmo Nogueira Barbosa pela dedicação e estímulo pessoal e finalmente a todos que de um modo direto ou indireto contribuíram nas diversas etapas desta jornada.

ABSTRACT

This work contributes to the methodological development of TM/Landsat-5 imagery application to geologic mapping of vegetated regions, through the analysis of the vegetation influence on the global and geologic information contents of multispectral/multitemporal images, selecting the best season for imagery acquisition and bands triplets with maximum information content, and defining a digital enhancements sequence. TM/Landsat imageries acquired in September, 1985 (end of the dry season), October, 1985 (beginning of the rainy season) and May, 1987 (end of the rainy season) were used. Classes of soil-rocks, green vegetation and mixture were recognized on the image of channel H (hue) generated from 4R3G5B dry season composite. Bands selection and information content analysis were done by methods developed by Sheffield (1985) and Chaves (1982), using multitemporal data and dry season imagery data subtracted by the vegetation class and vegetation plus mixture classes. Spatial and spectral attributes were treated and analyzed apart. Linear filtering applied to TM4 and to the first principal component was used to enhance spatial attributes. Decorrelation stretch and band ratios were chosen for spectral enhancement. At last, both attributes were integrated by IHS merging and hybrid composition. As a result, the subtraction of vegetation and mixture classes showed to stretch the information ellipsoids along the gray line of the RGB cube, as demonstrated by the increase in variance values and correlation coefficients. The best triplets selected for soils and rocks discrimination were TM3-TM5-TM7 and TM1-TM5-TM7. The triplets of May, 1987 imagery contained the least global information and the triplet TM3-TM4-TM5 of October, 1985 imagery was ranked with the greatest information content. Nevertheless, the dry season imagery data were preferred because they show the best contribution of the vegetation to photogeologic interpretation and favour the soil and rock spectral approach. Ratios 5/1, 3/1, and 5/3 were useful to detect particular geologic targets, whereas the 7R5G3B and 7R5G1B decorrelated composites allowed the discrimination of a greater number of lithologies, improving the mapping of basic-ultrabasic rocks, quartzites, arkoses and different kinds of superficial sediments. The photointerpretation of both attributes provides a geologic setting for the study area, which was confirmed by field and previous work data.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1- Introdução	1
1.2 - Objetivos	2
<u>CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO</u>	5
2.1 - Localização	5
2.2 - Aspectos fisiográficos	6
2.3 - Clima	8
2.4 - Solos.....	8
2.5 - Vegetação.....	8
2.6 - Atividade antrópica	13
2.7 - Geologia.....	13
2.7.1 - Esboço geotectônico.....	13
2.7.2 - Estratigrafia	14
2.7.2.1 - Embasamento	16
2.7.2.2 - Grupo Serra de Inhaúma	16
2.7.2.3 - Supergrupo Espinhaço	19
2.7.2.4 - Grupo Macaúbas	18
2.7.3 - Contexto metalogenético	19
<u>CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	21
3.1 - Aquisição de dados pelo sensoriamento remoto. 21	
3.2 - Comportamento espectral de alvos naturais.....	23

3.3 - Processos de composição de cores e percepção visual	28
3.4 - Seleção de bandas	30
3.5 - Processamento digital de imagens	32
<u>CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO</u>	39
4.1 - Seleção de imagens	41
4.2 - Pré-processamento	41
4.3 - Exclusão da vegetação	42
4.4 - Seleção de bandas e análise multitemporal.....	43
4.5 - Seqüência de processamento digital.....	44
4.6 - Fotointerpretação e comparação dos resultados.	46
<u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	47
5.1 - Exclusão da vegetação.....	47
5.2 - Análise dos parâmetros estatísticos.....	52
5.3 - Seleção e análise de imagens.....	63
5.3.1 - Seleção de bandas e análise do conteúdo de informação.....	63
5.3.2 - Comparação visual entre imagens da época seca e chuvosa em relação aos atributos espectrais.....	67
5.3.3 - Descrição e avaliação visuais das composições selecionadas da época seca	72
5.4 - Realce dos atributos espaciais	76
5.5 - Realce dos atributos espectrais.....	80
5.5.1 - Razão de bandas	80
5.5.1.1 - Seleção de razões de bandas	80
5.5.1.2 - Descrição das imagens razões.....	90
5.5.2 - Descorrelação de bandas	97

5.6 - Integração dos atributos	101
5.6.1 - Fusão IHS	101
5.6.2 - Composição híbrida	102
5.7 - Síntese da fotointerpretação	105
5.8 - Interpretação do arcabouço litoestrutural da área de estudo.....	112
<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Mapa de situação	5
2.2 - Vista panorâmica da área	7
2.3 - Parâmetros para seleção de imagens de satélite	9
2.4 - Mapa pedológico	10
2.5 - Mapa de vegetação	11
2.6 - Cerrado típico da região	11
2.7 - Manchas de vegetação do tipo caatinga	12
2.8 - Floresta decidual em início da caducifolia	12
2.9 - Síntese geotectônica	14
2.10 - Mapa geológico compilado da área de estudo ...	15
3.1 - Parâmetros que afetam a reflectância aparente.	24
3.2 - Principais elementos que contribuem para a coleta de dados em sensoriamento remoto.....	25
3.3 - O cubo de cores RGB	29
3.4 - Sensitividade visual em separar diferenças cromáticas.....	30
3.5 - Representação esquemática da distribuição de dados em três dimensões no cubo RGB	32
4.1 - Fluxograma simplificado do desenvolvimento metodológico	40
5.1 - Histograma do canal H gerado da composição 4R3G5B, dados padronizados de 13/09/85	48
5.2 - Máscara de vegetação, primeiro limiar	49
5.3 - Máscara de vegetação, segundo limiar	49
5.4 - Cobertura vegetal parcialmente seca em solos litólicos da Serra do Espinhaço	51

5.5 -	Histogramas de bandas TM da imagem de 13/09/85, após correção atmosférica	53
5.6 -	Histograma de bandas TM da imagem de 15/10/85, após correção atmosférica	54
5.7 -	Histogramas do tema "solos e rochas" (imagem de 13/09/85, com exclusão da vegetação, segundo limiar)	55
5.8 -	Variâncias de bandas TM para cinco conjunto de imagens.....	58
5.9 -	Histogramas de co-senos de ângulos de incidência de imagens multitemporais	59
5.10 -	Coefficientes de correlação de pares de bandas das 5 imagens	61
5.11 -	Inversão do coeficiente de correlação devido à componente de iluminação solar.....	62
5.12 -	Determinantes de tripletos de bandas	68
5.13 -	Elipses de informação para imagens de 13/09/85..	69
5.14 -	Composição 4R3G5B de 30/05/87 com ampliação de contraste	69
5.15 -	Composição 4R5G3B de 15/10/85 com ampliação de contraste	71
5.16 -	Composição 4R3G5B de 13/09/85 com ampliação de contraste	71
5.17 -	Composição 4R7G5B de 13/09/85 com ampliação de contraste	74
5.18 -	Composição 5R7G3B com pré-equalização das médias e ampliações lineares nos componentes I e S.....	75
5.19 -	Dois filtros lineares passa-altos.....	77
5.20 -	Banda 4 filtrada.....	79
5.21 -	Primeira componente principal filtrada	79
5.22 -	Gráficos de determinantes para valores estimados e reais	89
5.23 -	Razão 5D1, com eliminação de ruído	92
5.24 -	Razão 4D2	93

5.25 - Razão 5D3	93
5.26 - Razão 3D1	94
5.27 - Razão 7D4	94
5.28 - Composição 5D1R4D2G3D1B	96
5.29 - Composição 7R5G3B, descorrelacionada. 3D.P.	99
5.30 - Composição 7R5G1B, descorrelacionada. 3D.P.	100
5.31 - Composição 7D4R5D1G4D2B com substituição do canal I pela primeira c.p. filtrada	103
5.32 - Composição híbrida: 7R5G3B descorrelacionada, 2.D.P. com substituição da banda 5 pela primeira c.p. filtrada	104
5.33 - Mapas de temas espectrais	106
5.34 - Ocorrência de solo siltico-argiloso de composição caulínica e sericítica.....	109
5.35 - Extensões de afloramentos de quartzitos cobertos por uma fina crosta limonítica	110
5.36 - Mapa geológico	115
5.37 - Mapa de fotolineamentos.....	116

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 - Especificações técnicas do Landsat-5 e seus sensores	39
5.1 - Parâmetros estatísticos das passagens selecionadas e imagens com exclusão da vegetação.....	56
5.2 - Resultados dos métodos de seleção de bandas.....	64
5.3 - Melhores composições selecionadas	65
5.4 - Parâmetros estatísticos estimados para razões de bandas segundo o método de George e Dusseault (1986) - 13/09/85 - segundo limiar.....	82
5.5 - Parâmetros estatísticos estimados para razões de bandas segundo método de George e Dusseault (1986)-13/09/85 - dados totais	83
5.6 - Valores de determinantes obtidos de parâmetros estimados para imagem de 13/09/85 - segundo limiar	86
5.7 - Parâmetros estatísticos estimados e reais para a imagem 13/09/85 dados totais.....	87
5.8 - Cálculo de determinantes para dados estimados e reais.....	88
5.9 - Comparação visual de razões de bandas	92
5.10 - Matrizes de autovetores e autovalores.....	98
5.11 - Discriminação dos temas espectrais pelas imagens selecionadas	
5.12 - Caracterização das unidades fotogeológicas segundo a análise dos elementos de textura....	111

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto orbital tem sido uma importante ferramenta de auxílio aos trabalhos de mapeamento e prospecção geológica desde 1972, com o lançamento do primeiro satélite de recursos naturais da série Landsat. Uma de suas maiores vantagens refere-se à sua capacidade de visão sinótica ou global. Nesse potencial de aplicação, o sensoriamento remoto orbital possibilitou o mapeamento contínuo de amplas extensões da superfície do planeta, favorecendo a reinterpretação estrutural de grandes unidades tectônicas e correlações estratigráficas a um nível continental. Em relação à prospecção geológica, essas imagens facilitaram o traçado de feições estruturais relacionadas a ocorrências minerais, evidenciando estruturas até então desconhecidas, mesmo em áreas previamente mapeadas.

A princípio, o processo de extração da informação baseou-se nos métodos tradicionais de fotointerpretação. Porém, a apresentação dos dados no formato digital, com a possibilidade de emprego de computadores, e sobretudo o recente advento de novos sensores imageadores, como o "Thematic Mapper" a bordo do Landsat-5, que traz consigo significativos avanços tecnológicos em termos de melhor resolução, tanto aos níveis espacial, espectral e radiométrico, têm levado ao aprimoramento de uma nova abordagem metodológica baseada nas sutis diferenças espectrais de rochas, solos e vegetações. Desse modo, o sensoriamento remoto se aproxima dos métodos geofísicos de exploração, pois

permite o diagnóstico de materiais da superfície terrestre mais pelas suas propriedades espectrais particulares do que pelas espaciais (forma e tamanho). Dentro dessa linha de abordagem, tornou-se fundamental a compreensão do comportamento e efeito espectrais dos elementos integrantes da paisagem. Em áreas de vegetação esparsa, os novos sensores possibilitam a discriminação direta de litologias ou zonas de alteração. Por outro lado, para regiões densamente cobertas por vegetação, novas técnicas têm sido desenvolvidas para auxiliar a detecção de variações estruturais e taxonômicas da vegetação relacionadas às condições específicas do subsolo.

Na abordagem espectral, verifica-se comumente que estudos geológicos por imagens de satélite têm falhado em explorar ao máximo o potencial dessa ferramenta devido ao seu enorme volume de dados; por exemplo, uma imagem do sensor TM, que abrange 34.225 km², ocupa cerca de 260 megabytes em memória. Portanto, a extração da informação de interesse geológico desse conjunto de dados torna-se um intrigante desafio, demandando constante desenvolvimento de novos algoritmos e equipamentos que permitam melhor tratamento numérico das imagens, seja por processos de decisão automática ou por técnicas de realce. Do mesmo modo, é necessário o aprimoramento de abordagens metodológicas que orientem e potencializem a utilização das técnicas de tratamento de imagens, selecionando, da ampla gama de possibilidades, aquelas que melhor se aplicam a estudos geológicos específicos ou ao mapeamento básico de uma determinada região, tendo em vista as suas características fisiográficas e ambientais particulares.

1.2 - OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento metodológico de utilização de técnicas de sensoriamento remoto orbital, como auxílio ao mapeamento geológico de semidetalhe (1/50000) de regiões com significativa cobertura vegetal (O termo "significativo" traduz-se por uma cobertura vegetal que não pode ser desprezada em estudos de solos e rochas por Sensoriamento Remoto), ou seja, regiões com características fisiográficas e ambientais semelhantes à área em apreço. Dentro desse enfoque, o trabalho inclui os seguintes objetivos específicos:

Analisar a influência dos parâmetros sazonais (ângulos de iluminação e cobertura vegetal) quanto ao conteúdo de informação geológica presente em imagens multiespectrais/multissazonais, selecionando para área de estudo a época mais propícia à discriminação espectral de vários tipos de solos e rochas.

Classificar as melhores composições multiespectrais pelos métodos teóricos de seleção de bandas, e em seguida avaliar e comparar qualitativamente os resultados obtidos por cada método.

E sobretudo, definir uma seqüência de processamentos de imagens que permita trazer a um nível de reconhecimento visual, a mostra mais significativa da informação geológica contida em imagens do sensor TM-Landsat-5.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDO

2.1 - LOCALIZAÇÃO

A área objeto de estudo situa-se no município de Espinosa (MG), na divisa desse Estado com o Estado da Bahia (Figura 2.1). Cobrindo uma extensão aproximada de 350 km², abrange um prospecto da Metais de Minas Gerais S.A. (METAMIG) para pesquisa de ouro primário.

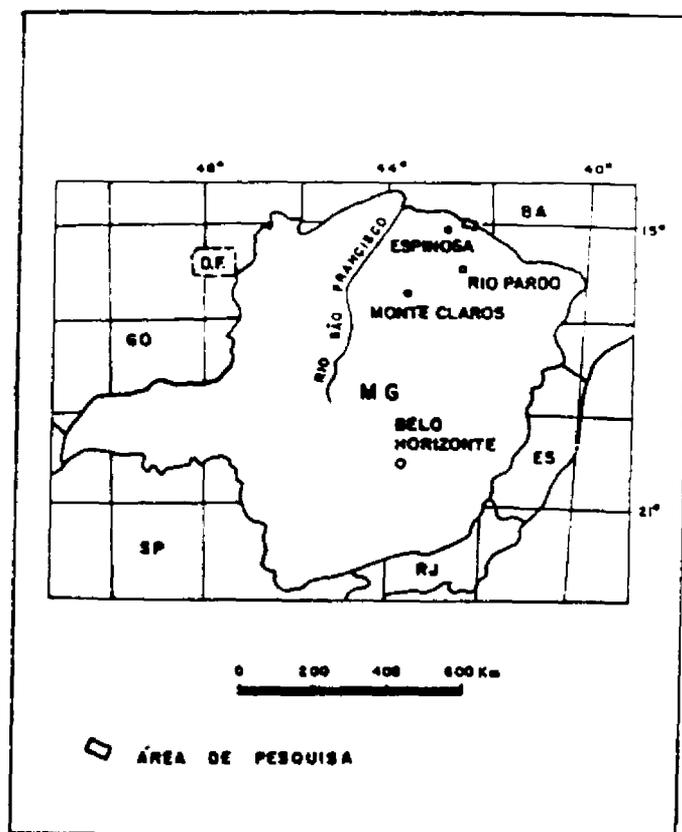


Fig. 2.1 - Mapa de situação.

O local pode ser alcançado por estradas secundárias bastante precárias a partir da cidade de Espinosa, distante cerca de 700 km de Belo Horizonte.

2.2 - ASPECTOS FISIOGRAFICOS

A fisiografia da região abrange diferentes contextos geomorfológicos, que condicionam nítidos contrastes paisagísticos por toda sua extensão. À primeira vista, a Serra do Espinhaço domina a paisagem. Ela constitui um sistema de cristas assimétricas orientadas para o nordeste e com flancos caindo para leste (Figura 2.2). Sua estrutura reflete a tectônica que gerou empurrões para oeste, aos quais se associam falhamentos perpendiculares ou oblíquos (Mauro et alii, 1982).

A Serra do Espinhaço representa uma importante barreira climática na região, pois retém a umidade a leste, ocasionando rios perenes que correm em direção à Bacia do Rio Pardo, enquanto a oeste ocorrem cursos intermitentes de escoamento rápido que constituem a Bacia do Rio Verde Pequeno, tributário do Rio São Francisco. Nas bordas da Serra do Espinhaço desenvolvem-se planaltos de transição, com suas formas de erosão diferencial e relevo em forma de colinas, as quais se tornam mais suave na porção ocidental. A sudeste da área inicia-se o domínio do Planalto dos Geraizinhos ou das chapadas do Alto do Rio Pardo, caracterizado por extensas superfícies de aplanamento (Mauro et alii, 1982).

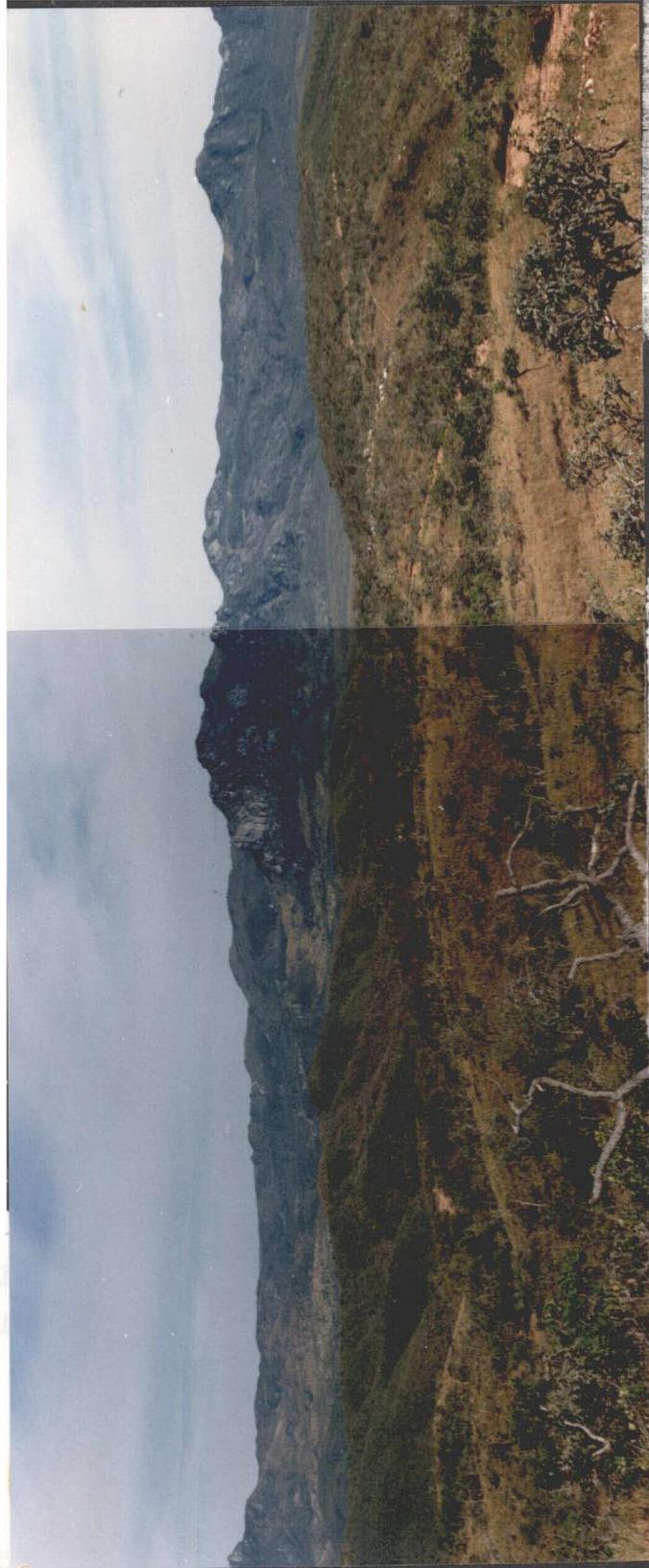


Fig. 2.2 - Vista panorâmica da área.

2.3 - CLIMA

Segundo a classificação de Koppen (Moutinho da Costa et alii, 1976), a região caracteriza-se por um clima quente, do tipo Aw, com estação seca bem acentuada, que pode durar até 6 meses, e uma estação chuvosa com início em outubro e término em abril. A precipitação média anual situa-se em torno de 750-800 mm e a temperatura média do mês mais frio é superior a 18⁰C, sendo que a amplitude térmica das médias mensais não ultrapassa 5⁰C (Figura 2.3).

2.4 - SOLOS

Em geral, os solos da região evidenciam influências litológicas (Krejci et alii, 1982). Nas chapadas, sobre o colúvio, desenvolvem-se solos bem drenados, argilo-arenosos, do tipo latossolo vermelho - amarelado. Associados às rochas do embasamento e aos xistos do Grupo Serra de Inhaúma, encontram-se solos podzólicos e cambissolos. Sobre os metassedimentos da Serra do Espinhaço ocorrem solos litólicos, enquanto localmente, sobre rochas básicas e ultrabásicas, desenvolvem-se latossolos de intenso matiz vermelho devido ao enriquecimento em ferro (Figura 2.4).

2.5 - VEGETAÇÃO

A área apresenta grande diversidade florística por tratar-se de uma região de transição entre diversos domínios botânicos. Via de regra, a vegetação dominante é o cerrado, aparecendo áreas de caatinga, floresta estacional decidual e zonas de tensão ecológica ou ecotono, caracterizadas por uma mistura de domínios florísticos (Silva e Assis, 1982). Ver Figura 2.5.

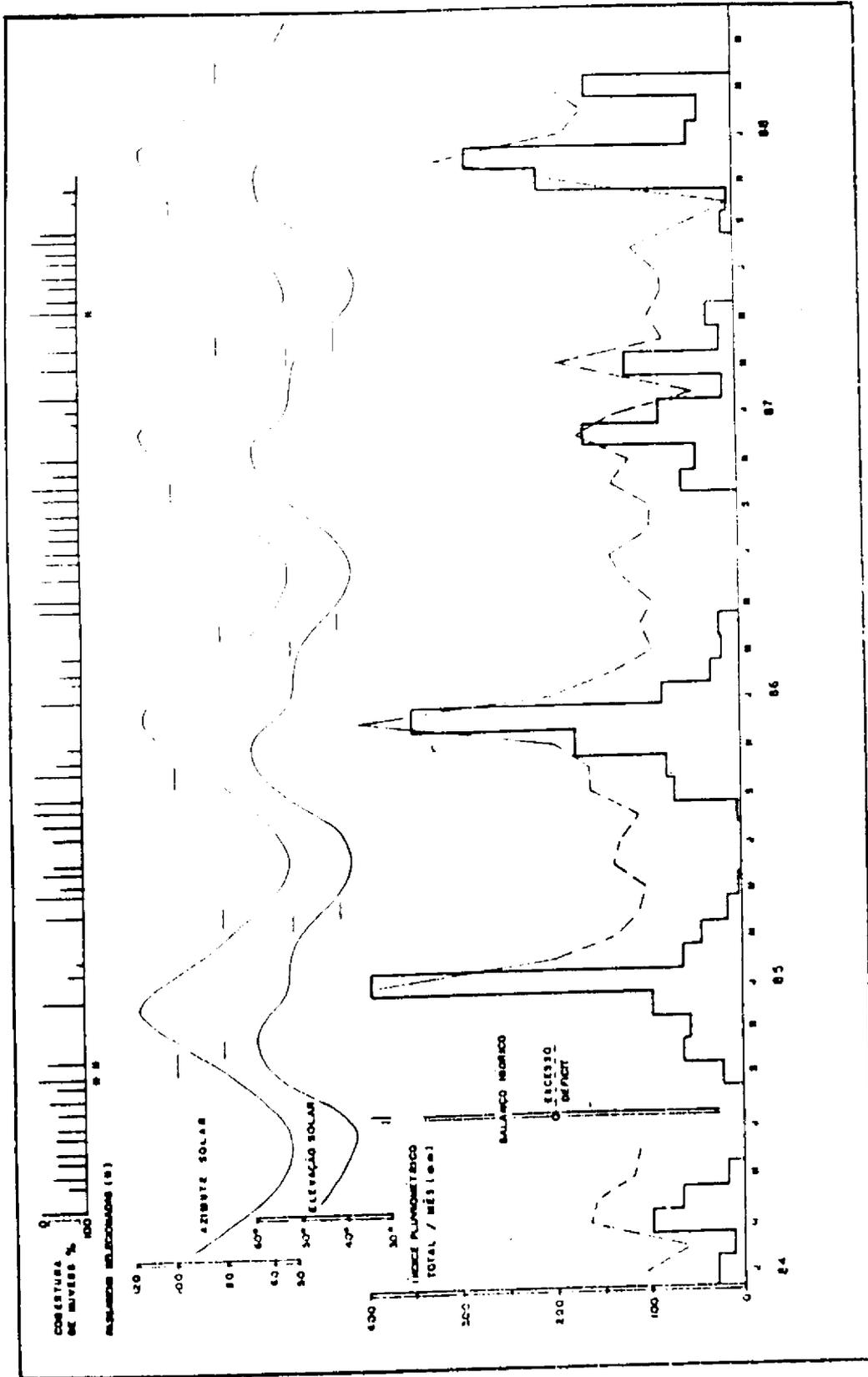


Fig. 2.3 - Parâmetros para seleção de imagem de satélite, referentes à órbita 218 ponto 70, Landsat-5, região de Espinosa, MG.
 FONTE: Boletim Agroclimatológico, 1984-1987.

O cerrado encontra-se cobrindo o cume da Serra do Espinhaço, sobretudo sobre quartzitos, e ocupando áreas associadas ao Grupo Serra de Inhaúmas e às chapadas do Alto Rio Pardo (Figura 2.6). Ele é do tipo arbóreo aberto, sem floresta de galeria, podendo ainda ocorrer algumas manchas de cerrado parque (Silva e Assis, 1982). A caatinga ocupa as depressões da região do planalto dissecado do bordo da Serra do Espinhaço, principalmente, em sua porção oriental (Figura 2.7). A floresta estacional decidual desenvolve-se principalmente sobre as vertentes mais úmidas da Serra do Espinhaço e do embasamento. Sua caducidade foliar decorre da deficiência hídrica sazonal (Silva e Assis, 1982). Ver Figura 2.8.

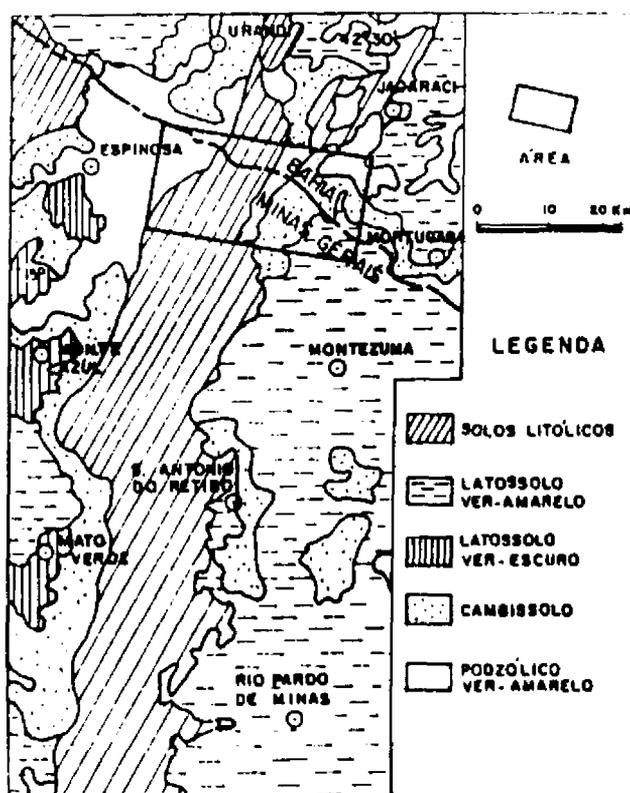


Fig. 2.4 - Mapa pedológico.

FONTE: Krejci et al. (1982).

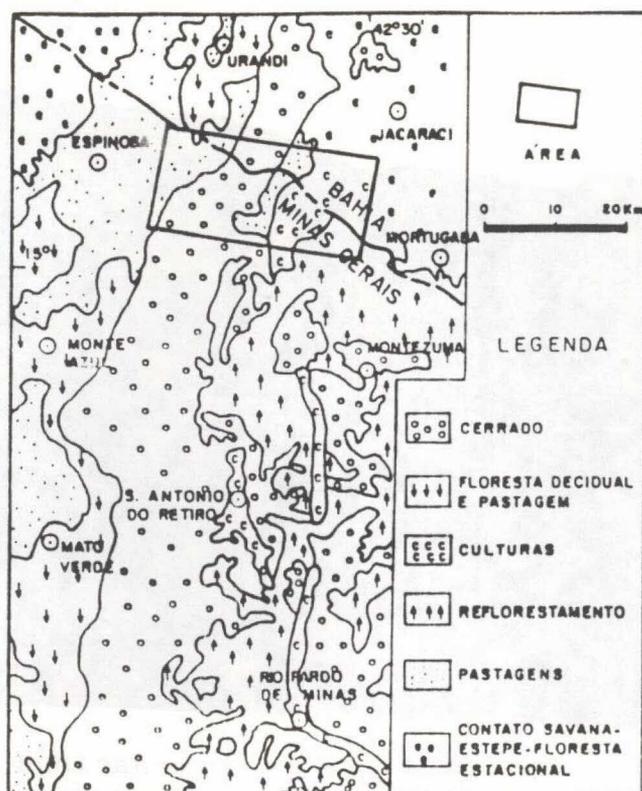


Fig. 2.5 - Mapa de vegetação.
 FONTE: Silva e Assis (1982).



Fig. 2.6 - Cerrado típico da região (maio/1988).



Fig. 2.7 - Manchas de vegetação do tipo caatinga (maio/1988).

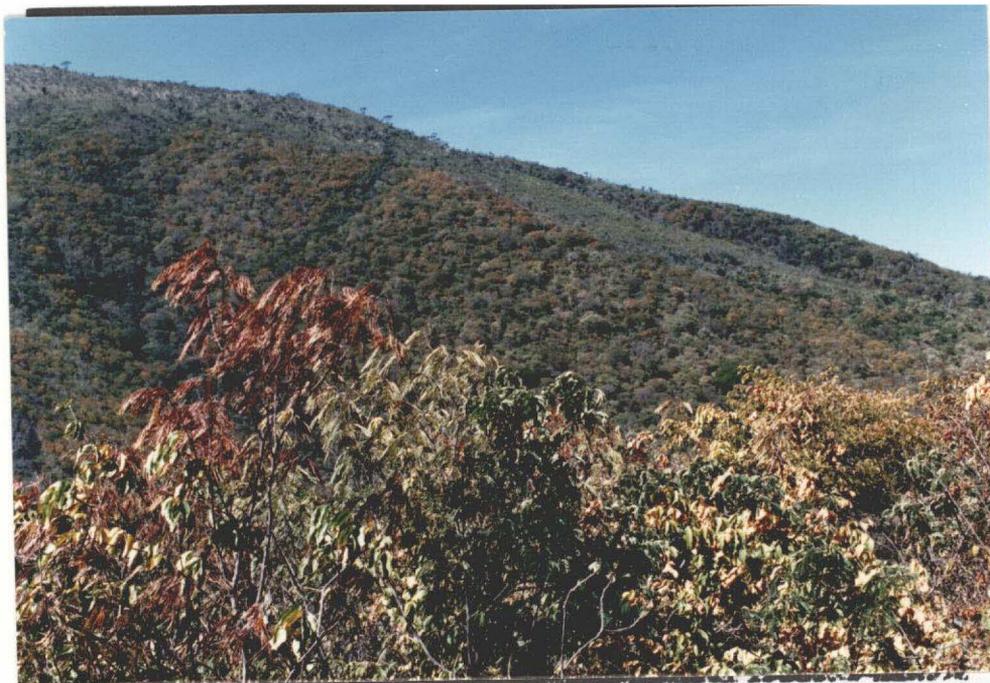


Fig. 2.8 - Floresta decidual em início do processo da cadu
folia (maio/1988).

2.6 - ATIVIDADE ANTRÓPICA

Como principais usos do solo sobressaem a atividade pecuária extensiva e o cultivo de algodão herbáceo. Em menor escala, encontram-se culturas de subsistência como o milho e o feijão. Uma atividade que chama a atenção é o intenso carvoejamento causado pelo processo de substituição da mata natural por pastagens e reflorestamento de eucalipto.

2.7 - GEOLOGIA

2.7.1 - ESBOÇO GEOTECTÔNICO

O arcabouço geológico da região pode ser descrito em termos de sua principal unidade geotectônica, o Craton do São Francisco (Almeida, 1977). Ver Figura 2.9. O Supergrupo Espinhaço faz-se representar aí em dois domínios orográficos distintos, separados por uma janela de embasamento cristalino. A oeste, ele consiste em um bloco falhado e basculado, representado pela Serra Central. A leste, no domínio da Serra do Espinhaço, constitui um sistema linear de dobramentos de direção norte-sul, que se estende desde o centro do Estado de Minas Gerais até ao norte da Bahia. A oeste da Serra Central encontram-se os metassedimentos pelito-carbonáticos do Grupo Bambuí, que correspondem à cobertura cratônica pouco deformada (Pedreira et alii, 1978). Já no lado oriental da Serra do Espinhaço, ocorrem rochas associadas aos Grupos Serra de Inhaúmas e Macaúbas, este último considerado equivalente ao litotipo geossinclinal da faixa marginal de dobramento Araçuaí, de Almeida (1977), desenvolvida no Proterozóico Superior (Fernandes et alii, 1982).

A Serra do Espinhaço consiste em um sistema linear de megassinclínórios e anticlinórios fechados e estruturados em escamas de empurrão. Ao redor do paralelo 15⁰, sofre uma inflexão para o nordeste, acompanhando o grande arco descrito pela faixa de dobramento Araçuaí, que se circunscribe a um antigo núcleo rígido anterior, do tipo protocraton arqueano, denominado por Mascarenhas (1981) núcleo de Medina (Figura 2.9).

2.7.2 - ESTRATIGRAFIA

A descrição seguinte baseia-se na compilação dos levantamentos geológicos realizados na região por Moutinho da Costa et alii (1976), Moraes et alii (1980) e Fernandes et alii (1982). Ver Figura 2.10.

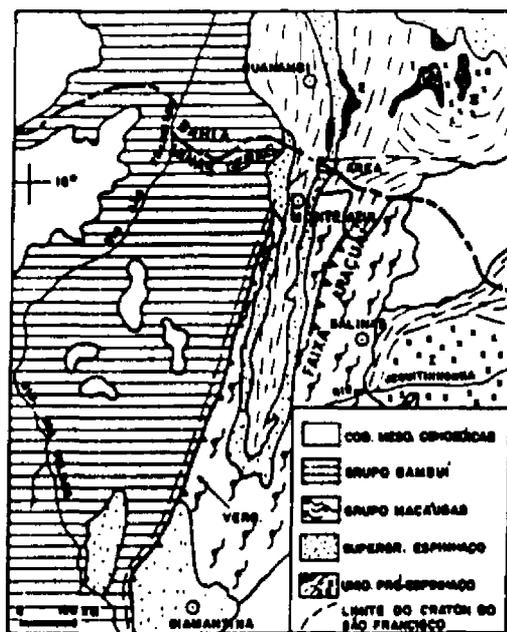


Fig. 2.9 - Síntese geotectônica.

FONTE: Almeida (1977) e Pedreira et al. (1978).

- "Greenstonebelts": 1) Brumado, 2) Urandi.
Protocratons: I) Medina, II) Aracatu.

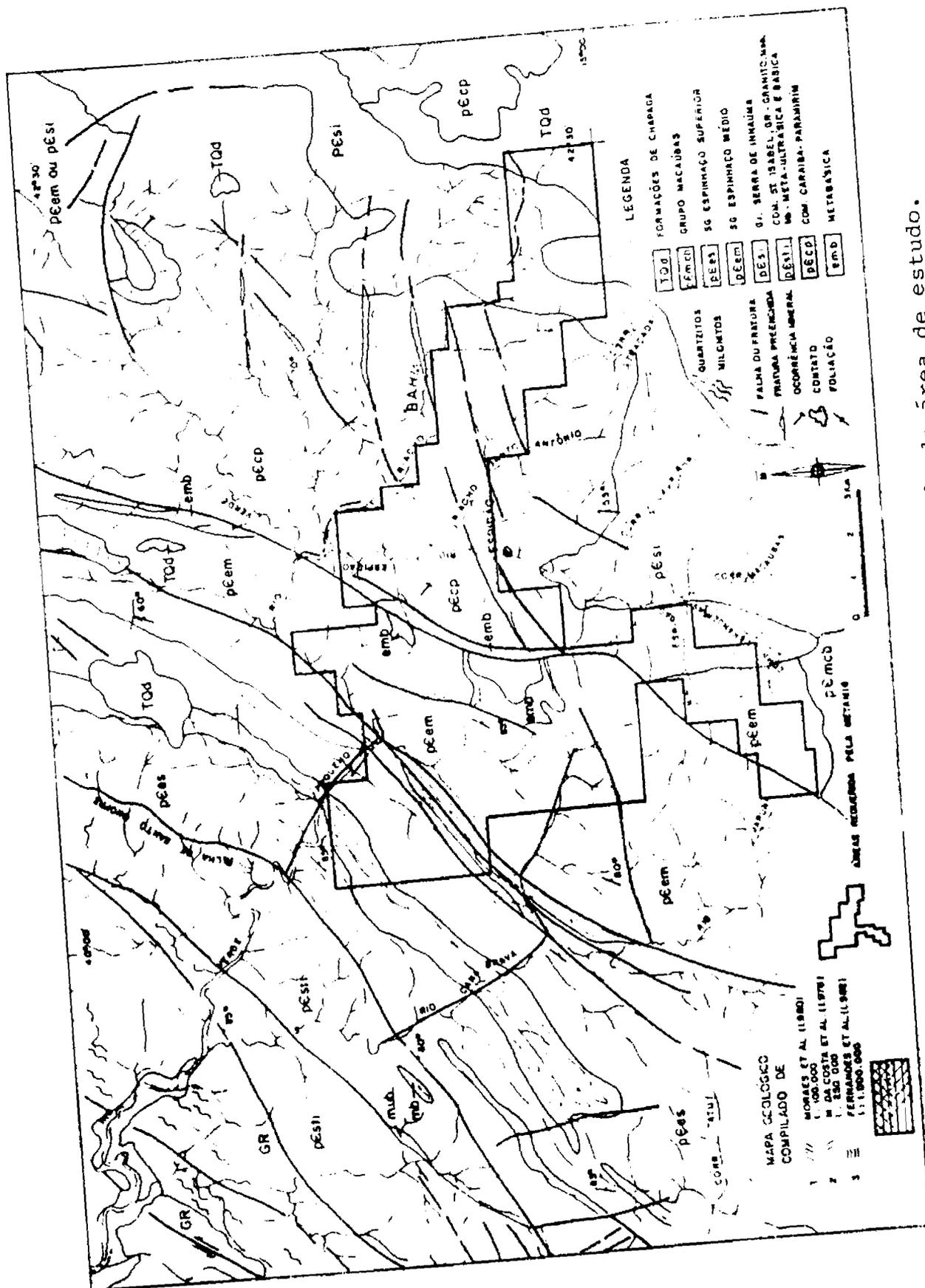


Fig. 2.10 - Mapa geológico compilado da área de estudo.

2.7.2.1 - EMBASAMENTO

Fernandes et alii (1982) dividiram-no, de acordo com as assembléias litológicas e áreas de ocorrência na região em apreço, em dois complexos:

- a) Complexo Caraíba-Paramirim, encontrado a este da Serra do Espinhaço, engloba uma seqüência polimetamórfica, onde se destacam gnaisses tonalíticos, granodioritos com zonas anatéticas e migmatizadas, corpos graníticos e restos de supracrustais. O metamorfismo predominante é de fácies anfibolito, atingindo excepcionalmente o fácies granulito.
- b) O Complexo Santa Isabel reúne um conjunto de gnaisses e migmatitos, com núcleos de rochas básicas, ultrabásicas, anfibolitos e granulitos, que foi posteriormente cortado por diques de rochas básicas de pequenas dimensões.

As rochas do embasamento mostram por toda parte sinais de cisalhamento e tectonização, relacionados à estruturação proterozóica da região. Os contatos com o Supergrupo Espinhaço são feitos, em muitos locais, por falhamentos (Fernandes et alii, 1982).

2.7.2.2 - GRUPO SERRA DE INHAÚMA

A unidade, definida por Lima et alii (1981), compreende uma seqüência de metaconglomerados polimíticos, metaarcózios e micaxistos com lentes subordinadas de quartzito, que jazem sobre o Complexo Caraíba-Paramirim. Em relação ao Supergrupo Espinhaço, essa seqüência mostra

características distintas como presença abundante de metapelitos e grau metamórfico mais alto. Suas relações com o Grupo Macaúbas também são pouco claras, podendo ainda ser correlacionada com as seqüências sedimentares da Chapada de Diamantina (Fernandes et alii (1982)).

2.7.2.3 - SUPERGRUPO ESPINHAÇO

Na região em estudo, Moutinho da Costa et alii (1976) apresentaram uma sistematização estratigráfica para esses metassedimentos, utilizando a categoria de Supergrupo Espinhaço e dividindo-os informalmente em três grupos: inferior, médio e superior. O grupo inferior corresponde ao complexo Rio dos Remédios de Schobbenhaus Filho e Kaul em 1971, citados por Pedreira et alii (1978). Inicia-se por metaconglomerado basal, passando ao predomínio de vulcanitos félsicos e piroclásticas diversas, freqüentemente filonitizados, e com intercalações subordinadas de quartzito. Os termos vulcânicos predominantes são quartzo-queratôfiros, riolitos e riodacitos (Moutinho da Costa et alii, 1976). Segundo estes autores, essa unidade engloba toda a faixa de vulcanitos que bordeja a Serra do Espinhaço pelo seu lado oeste. O grupo médio, fáceis Serra do Espinhaço, equivalente à Formação Canatiba do Grupo Santo Onofre de Fernandes et alii (1982), abrange um pacote de quartzitos variegados e ocorrências locais de conglomerados, filitos e xistos. Moutinho da Costa et alii (1976) consideram como tal uma faixa aflorante no flanco da Serra do Espinhaço, bem como uma vasta parte do complexo litológico encontrado na região entre Rio Pardo de Minas e Montezuma. O grupo superior está representado principalmente por termos litológicos que variam de quartzitos líticos, feldspáticos, grauvacas, filitos, xistos, e subordinadamente, siltitos carbonáticos e/ou

manganesíferos e hematíticos. Moutinho da Costa et alii (1976) e Pedreira et alii (1978) correlacionam este grupo aos metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina; por outro lado, sua faixa aflorante na Serra do Espinhaço é designada por Fernandes et alii (1982) Formação Sítio Novo do Grupo Santo Onofre .

Quanto à evolução tectono-sedimentar do Supergrupo Espinhaço, a hipótese mais aceita é de um desenvolvimento ensiálico, correspondendo a um regime de rifteamento de antigas paraplataformas (Scholl e Fogaça, 1979 ; Brito Neves et alii, 1979). Esse processo de dinâmica crustal teve início por volta de 1700-1800 m.a. e término com redobramento e novo metamorfismo no Brasileiro (Brito Neves et alii, 1979).

2.7.2.4 - GRUPO MACAÚBAS

Abrange três unidades descritas da base para o topo (Fernandes et alii, 1982): **Salinas** - composta por biotita-quartzo xisto, às vezes carbonáticos, granada-biotita-quartzo xistos e intercalações de quartzitos e conglomerados; **Carbonita** - formada por quartzo-biotita xistos, granada-quartzo-sericita xistos, que às vezes constituem camadas grafitosas e manganesíferas, intercalações de quartzito, estaurolita-cianita xistos e ainda na borda oeste da bacia, filitos de mais baixo grau metamórfico; por último, a **Formação Jequitaí** - constituída por metadiamicritos com matriz grauvaquiana e intercalações de quartzito, é considerada como representante de uma pretérita glaciação do Proterozóico Superior.

2.7.3 - CONTEXTO METALOGENÉTICO

O principal interesse da região no tocante à prospecção mineral é para ouro primário. Como a área de estudo engloba diversas unidades geológicas de idades do Arqueano até o Proterozóico Médio, vários modelos metalogenéticos podem ser adotados como orientação aos trabalhos de prospecção mineral.

Ocorrências de rochas básicas e ultrabásicas na região sugerem a presença de seqüências do tipo "Greenstonebelt". Mineralizações auríferas em seqüências desse tipo são conhecidas em outros lugares encaixadas em corpos sulfetados estratiformes associados a formações ferríferas bandadas ou a rochas carbonáticas intercaladas em vulcanitos básicos e tufos ácidos (Ladeira, 1980; Viera, 1987). Nesse ambiente o ouro é freqüentemente encontrado em veios de quartzo (Condie, 1981), assim como zonas de cisalhamento são consideradas importantes metalotectos na prospecção desse metal.

Por outro lado, ocorrências de ouro primário na região são mais freqüentes nos metassedimentos e nas metavulcânicas ácidas, respectivamente Grupo Chapada de Diamantina e Formação Rio dos Remédios (Fernandes et alii, 1982), ambas pertencentes ao Supergrupo Espinhaço. Dentro desse contexto, depósitos auríferos mais comuns são encontrados em veios de quartzo encaixados nessas litologias, que em geral, evidenciam controle estrutural. Em relação aos metassedimentos, Ulhein et alii (1986) descrevem veios de quartzo auríferos encaixados principalmente em unidades metapelíticas.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 - AQUISIÇÃO DE DADOS PELO SENSORIAMENTO REMOTO

Uma imagem de satélite é uma representação bidimensional de valores de radiância coletada de cada elemento de resolução do terreno. Por se tratar de uma representação em formato digital, esses valores são codificados em níveis de cinza equivalentes a um número finito de bits, cuja transformação pode ser expressa para um sistema linear pela Equação 3.1 de Gillespie et alii (1987).

$$NC = a_i \int_{\Delta\lambda} L_{\lambda s} \cdot C_{\lambda} \cdot d\lambda + b_i \quad (3.1)$$

onde: $L_{\lambda s}$ é a radiância espectral que alcança o sensor; C_{λ} , a sensibilidade espectral do sensor; a_i , o ganho de amplificação; b_i , a corrente "negra" (dark current); i , o canal espectral e NC , o nível de cinza, no caso TM-LANDSAT de 0 a 255.

A partir da leitura de radiância, pretende-se obter uma medida da reflectância de alvos naturais. A radiância, contudo, antes de alcançar o sensor, é modificada pelos efeitos atmosféricos: multiplicativo equivalente à transmitância atmosférica e aditivo devido ao espalhamento na direção da trajetória. Essa relação é descrita pela Equação 3.2 (modificada de Slater, 1980), da qual se obtém, também, a influência das relações geométricas de iluminação, expressa principalmente pelo ângulo de incidência (θ). Ver Figura 3.1. Quanto maior

for esse ângulo, menor será a irradiância na superfície, para θ maior do que 90° essa estará mesmo sombreada. Isto implica que, em consequência das condições de iluminação, alvos com mesma reflectância, mas em situação topográfica diversa, produzirão respostas de radiância distintas ao nível do sensor, ou seja:

$$L_{\lambda s} = 1/\pi \cdot \left[\epsilon_{\lambda 0} \cdot \cos \theta \cdot \tau \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{\lambda d}(\theta, \phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\phi \cdot \rho_{\lambda} \right] \cdot \tau' + 1/\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} L_{\lambda a}(\alpha, \beta) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha d\beta \quad (3.2)$$

onde: $\epsilon_{\lambda 0}$ é a irradiância solar espectral numa superfície perpendicular aos raios solares, no topo da atmosfera; θ , o ângulo entre a direção do fluxo solar incidente e a normal da superfície; τ , a transmitância atmosférica entre a fonte e o alvo; ϕ , o ângulo solar azimutal; $L_{\lambda d}$, a radiância espectral descendente ocasionada pelo fluxo solar espalhado, dependendo das coordenadas θ e ϕ ; ρ_{λ} , a reflectância espectral da superfície de interesse; $L_{\lambda a}$, a radiância espectral ascendente causada pelo espalhamento atmosférico; α , β os ângulos respectivamente de elevação e azimutal, definidos pela direção de visada do sensor (segmento que une o centro ótico do sensor ao alvo (Figura 3.1), α_1 - α_2 , β_1 - β_2 definem o

campo de visada do sensor e τ' , a transmitância atmosférica entre o alvo e o sensor.

Uma relação importante não explícita pela equação anterior é que pela sua resolução pode-se determinar o valor da reflectância (definida como a razão entre o fluxo solar refletido e o fluxo solar incidente), somente para alvos que se comportam como superfícies lambertianas. Como os alvos naturais são substancialmente anisotrópicos, o que se obtém na maioria das vezes através desta medida é um valor conhecido como reflectância bidirecional, função dos parâmetros geométricos θ , ϕ , α , β e ângulos sólidos correspondentes $\Omega(\theta_1-\theta_2, \phi_1-\phi_2)$ e $\Omega'(\alpha_1-\alpha_2, \beta_1-\beta_2)$. Ver Figura 3.1. Portanto, a aquisição de imagens multiespectrais/multissazonais requer a compreensão desses parâmetros acima descritos, seja no tocante aos seus efeitos sobre a reflectância de alvos obtida a partir da radiância lida pelo sensor, seja quanto à seleção das condições de iluminação mais adequadas às diferentes abordagens desejadas em estudos por sensoriamento remoto.

3.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS NATURAIS

A discriminação de superfícies naturais pela determinação de suas reflectâncias é uma das questões mais complexas no sensoriamento remoto. Em uma investigação geológica procura-se, a princípio, informações sobre o substrato rochoso. Via de regra, no entanto, a resposta gravada será proporcional à integração ponderada das reflectâncias dos componentes superficiais contido no elemento de resolução do terreno, no caso TM, uma área de 900 m² coberta pela associação de vegetação, solo e rocha (Figura 3.2). Dessa forma, torna-se fundamental a

compreensão do comportamento e efeito espectrais, bem como das interrelações ambientais desses elementos da paisagem.

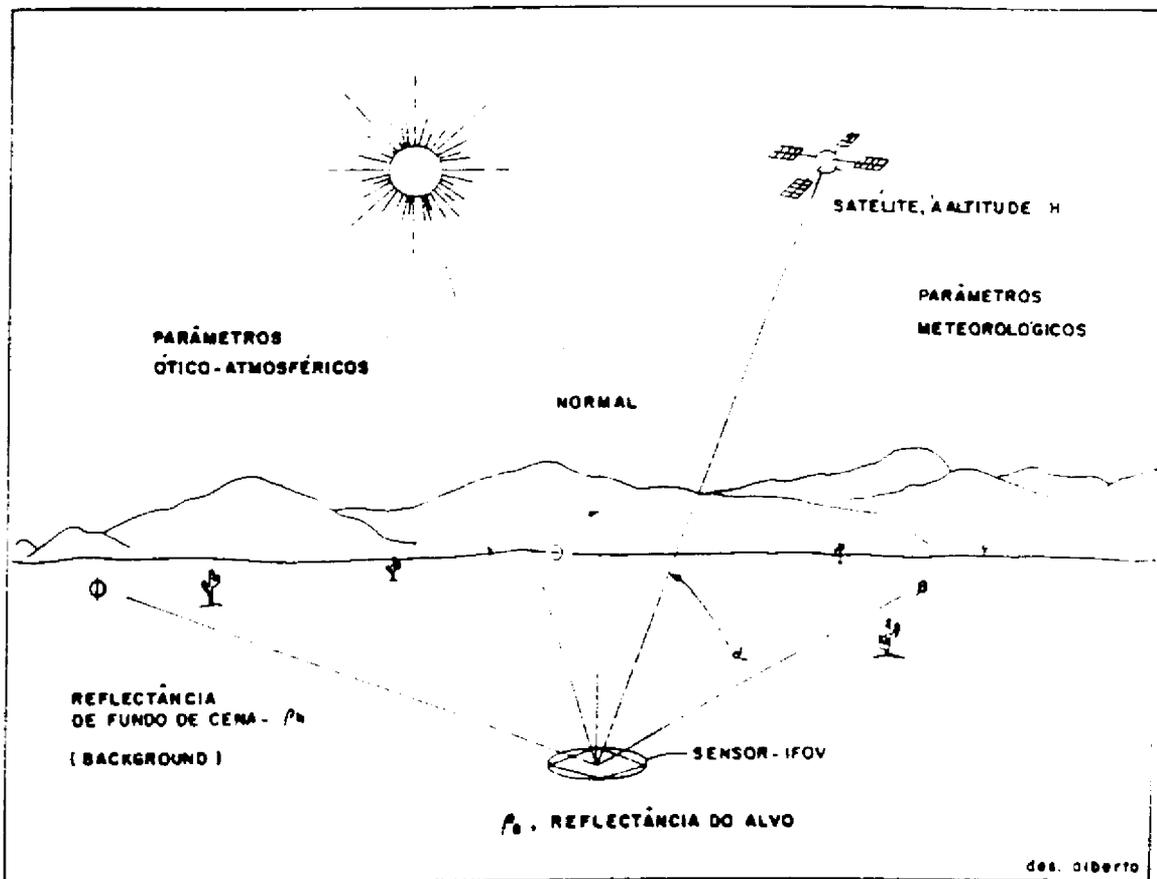


Fig. 3.1 - Parâmetros que afetam a refletctância aparente.
FONTE: Modificada de Bowker et al. (1985).

A interação da Radiação Eletromagnética (REM) com superfícies naturais se dá tanto a um nível macroscópico, controlado, por exemplo, pelas propriedades físicas da superfície, granulometria, forma, compactação e micro-macrorrelevo, como a um nível microscópico, diretamente relacionado à composição atômica ou molecular do material. Diversos trabalhos descrevem o comportamento espectral de rochas e minerais a partir de medidas espectroscópicas de laboratório, entre os quais são citados Hovis Jr. e Callahan (1966); Hunt et alii (1973); Hunt et alii (1974); Hunt e Salisbury (1976 a,b) e Hunt (1977).

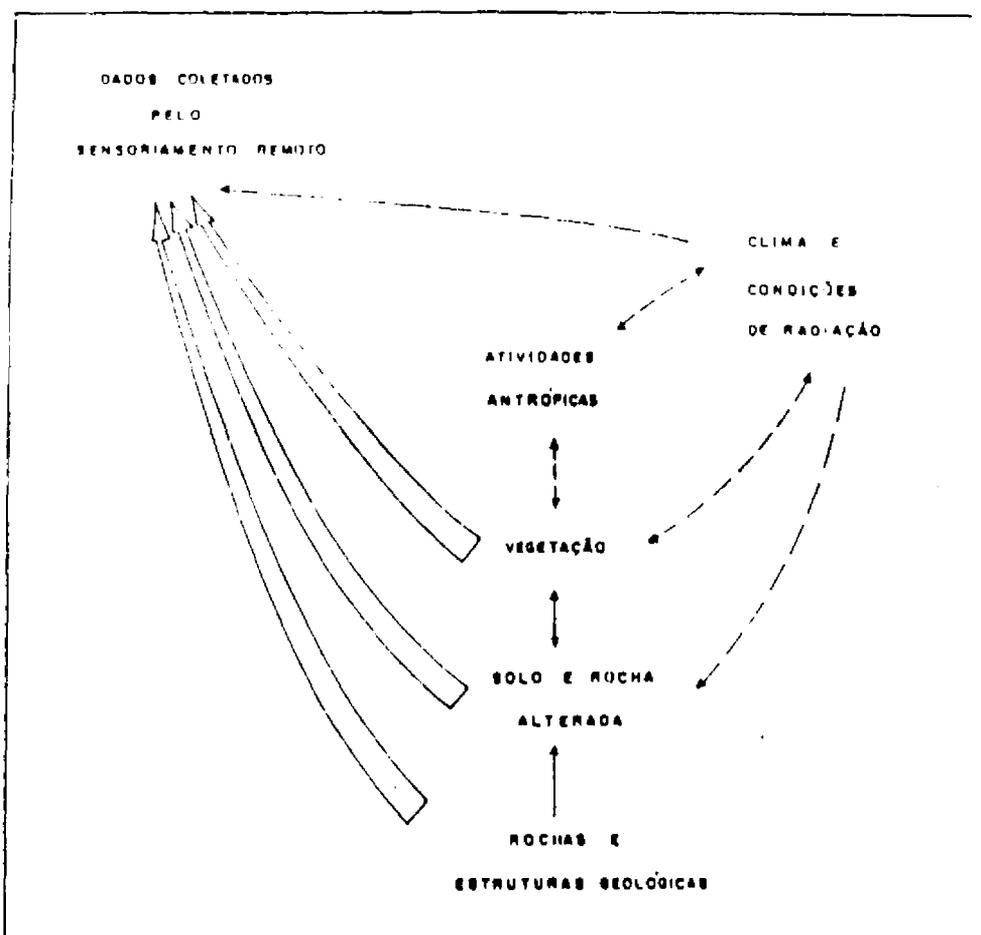


Fig. 3.2 - Principais elementos que contribuem para a coleta de dados em sensoriamento remoto.

FONTE: Modificada de Almeida Filho e Vitorello (1982).

No entanto, em regiões tropicais como é o caso da área de estudo, rochas frescas raramente afloram, o que implica que o estudo do comportamento espectral de rochas nessas condições só faz sentido quando visto sob a luz das modificações introduzidas pelos processos de intemperismo e formação de solos, os quais podem fornecer uma resposta indireta a respeito do substrato geológico que os originou. Basicamente, as curvas espectrais de solos são controladas por cinco parâmetros: conteúdo de umidade, matéria orgânica, estrutura, textura e óxidos de ferro (Baumgardner and Stoner, 1982).

A vegetação é um dos parâmetros que mais interfere na resposta espectral de alvos, podendo alterar ou mesmo mascarar significativamente a reflectância do conjunto solo-rocha. A magnitude desse efeito depende da quantidade, do tipo e do estado fenológico da vegetação, como também da reflectância do substrato geológico. Reflectâncias de materiais com baixo albedo podem ser alteradas além do reconhecimento por apenas uma pequena percentagem de cobertura vegetal verde (Siegal and Goetz, 1977) e mesmo a vegetação seca ou desfolhada tem um efeito na alteração da resposta espectral do material geológico subjacente, devido ao sombreamento propiciado pelo material lenhoso restante e à deposição de matéria orgânica, decomposta ou não, sobre o solo. A remoção da resposta da vegetação ou de outra classe de cobertura de solo de um elemento de resolução de imagem pode ser obtida através de técnicas de misturas, que são modelos matemáticos, que relacionam os sinais espectrais de uma área composta por uma mistura de classes, com os sinais puros de cada componente, permitindo com isso a quantificação da percentagem das diferentes classes em um único pixel (Correia, 1983). Como exemplo, Adams e Adams

(1984) utilizaram dessa técnica para remover a resposta da vegetação de misturas espectrais de solo-rochas e vegetação em imagens Landsat.

Por outro lado, as plantas estão integradas às condições ambientais, de tal forma que a informação espectral exibida por uma comunidade botânica natural pode servir de resposta indireta ao substrato geológico. Os trabalhos de Birnie (1982); Collins et alii (1983); Goetz et alii (1983); Green et alii (1985); Banniger (1985) e Lulla (1985), entre outros, discorrem sobre técnicas e utilização da resposta espectral da vegetação para o mapeamento de litologias e detecção de ocorrências minerais. A observação dos vários parâmetros da vegetação, que podem ser modificados ou influenciados por variações do substrato geológico ou condições geoquímicas dos solos, constitui a estratégia básica da prospecção geobotânica. Segundo Mouat (1982), os principais fatores que se relacionam às condições físico-geoquímicas dos solos, de relevância à geobotânica e ao sensoriamento remoto, podem ser agrupados em três categorias:

- 1) Estrutural - inclui mudanças morfológicas da planta ou vegetação, por exemplo, densidade de cobertura vegetal, mutação das folhas, flores ou frutos, mudanças fenológicas, tipo clorose (decaimento da concentração de pigmentos foliares) e alterações temporais nos ciclos fisiológicos sazonais das plantas.
- 2) Taxonômica - refere-se à variação da composição da vegetação em relação tanto à estrutura da comunidade como à ausência ou presença de espécies particulares.

- 3) Espectral - diz respeito à interação da vegetação com a REM, afetada por um dos primeiros fatores ou por ambos.

Sobre áreas mineralizadas, a resposta desses fatores é freqüentemente única, relacionando-se, em geral, à deficiência ou desbalanço de nutrientes, toxidez e estresse causados por concentração mineral anômala ou baixa retenção de água pelo solo (Mouat, 1982). Outro aspecto relevante aos trabalhos de geobotânica espectral é a consideração de que muitas dessas alterações só aparecem dentro de um certo estágio ou intervalo periódico de crescimento da vegetação, o que implica na necessidade de abordagem multissazonal para seleção da melhor época de aquisição de dados.

3.3 - PROCESSOS DE COMPOSIÇÃO DE CORES E PERCEPÇÃO VISUAL

Para a exibição de imagens multiespectrais usa-se, em geral, o processo de composição colorida. Esse tipo de apresentação explora a vantagem da visão humana ser mais capaz de discriminar cores do que tons de cinza, respectivamente, cerca de milhares contra 16 a 32 para um observador médio (Slater, 1980). Outro ganho é a possibilidade de apresentação integrada de três conjuntos de dados ou canais espectrais. Em um monitor de vídeo colorido adota-se o sistema aditivo primário. As cores resultantes serão uma mistura aditiva, em várias proporções, das cores vermelha, verde e azul, assinaladas a cada um dos canhões luminosos associados às bandas espectrais. Esse processo pode ser representado pelo cubo RGB, que consiste em um espaço de cores tridimensional. Qualquer cor resultante da adição de três intensidades diferentes das componentes RGB será representada por um vetor dentro desse cubo (Figura 3.3).

O triângulo formado pela união dos vértices vermelho, verde e azul do cubo RGB é conhecido como diagrama de cromaticidade digital: ele indica os matizes e as saturações das cores obtidas pelo processo aditivo. Uma relação importante exibida nesse diagrama é a habilidade da visão humana em separar diferenças cromáticas (Figura 3.4). Ela será maior na região de pequenas elipses e ao longo de seus eixos menores (Slater, 1980). Uma aplicação deste estudo refere-se à escolha do canhão de cor a ser assinalado a cada conjunto de dados. Por exemplo, a visão humana é mais sensível a mudanças de matiz e saturação, em ordem decrescente, de azul, vermelho e verde, e percebe maior contraste cromático entre vermelho e verde, e azul e vermelho (Greenbaum, 1987).

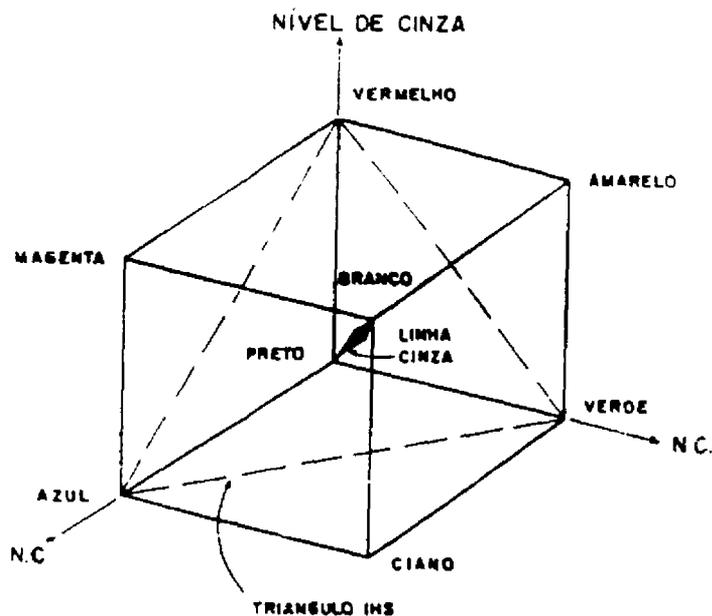


Fig. 3.3 - O cubo de cores RGB.

FONTE: Schowengerdt (1983).

3.4 - SELEÇÃO DE BANDAS

Como imagens de satélite consistem em dados multivariados, torna-se fundamental a seleção ótima do subconjunto ou triplete de bandas que produzirá uma composição colorida com a melhor mostra da informação e poder de discriminação. Um tipo de abordagem ao processo de seleção de bandas baseia-se na análise de curvas espectrais de alvos naturais obtidas por espectroscopia de campo ou laboratório. Bird et alii (1986) sugerem também a seleção de bandas espectrais no âmbito do impacto visual, posto que no contexto da interpretação fotogeológica nem sempre o conhecimento de propriedades de reflectância espectral é necessário ao intérprete. Porém, a grande dificuldade dessa última abordagem reside no elevado número de combinações a serem tentadas para a escolha da composição com maior impacto visual.

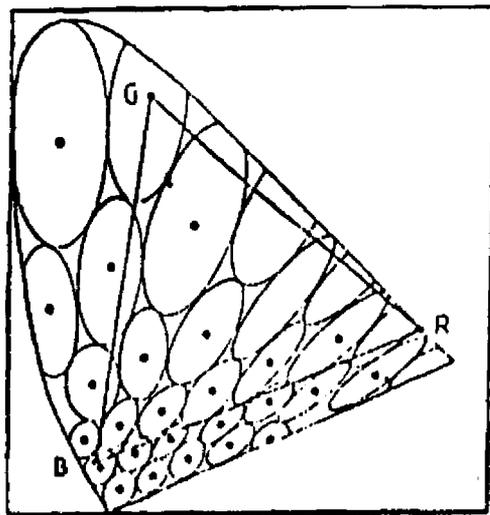


Fig. 3.4 - Sensitividade visual em separar diferenças cromáticas.

FONTE: Canas e Barnett (1965).

(Representada nos diagramas de cromaticidade da C.I.E. e digital-triângulo). Elipses menores in dicam maior facilidade de separação.

Dentro de um processo numérico de seleção de bandas é interessante compreender melhor a estrutura da informação contida em uma imagem multiespectral no que se refere ao conceito de "ranking" ou níveis de informação descritos por Feng (1985). Em uma imagem multiespectral, o conteúdo de informação está estratificado em camadas ou níveis de informação. Essa mistura de informações muitas vezes não é totalmente visualizada e interpretada, porque somente a parte que mostra alto contraste é prontamente reconhecida. De acordo com esse mesmo autor, para estudos geológicos a informação contida em uma imagem de satélite pode ser estruturada em três ou mais níveis de informação, que se relacionam com a magnitude da variância, decrescente à cada nível de maior grau.

O primeiro nível, em geral, representa o contraste entre água e terra, efeito topográfico e separação entre solo-rocha e vegetação verde. O segundo nível corresponde ao contraste entre diferentes paisagens representativas de unidades geológicas ou geomorfológicas. Em regiões com relevo acidentado, o contraste entre a vegetação e o conjunto solo-rocha pode se enquadrar neste nível. E o terceiro nível representa as sutis diferenças espectrais, relacionadas principalmente com as variações de rochas e solos.

Em um processo de interpretação geológica, baseado tanto nos atributos espaciais como espectrais, um triplete ideal de bandas será aquele em que a cada banda se associe, em preponderância, um nível de informação (Feng, 1985). A matriz de variância-covariância é uma maneira estatística de analisar o conteúdo e distribuição dos dados espectrais. A variância é tomada como equivalente a uma medida proporcional à informação,

enquanto a alta covariância ou coeficiente de correlação significa redundância dos dados ou duplicação da informação (Feng, 1985). Essa análise é pertinente ao processo de seleção de bandas, pois canais fracamente correlacionados geram composições bem coloridas, ao contrário de dados com forte correlação, os quais mostram uma gama restrita de cores, podendo inclusive aparecer monocromáticos (Figura 3.5).

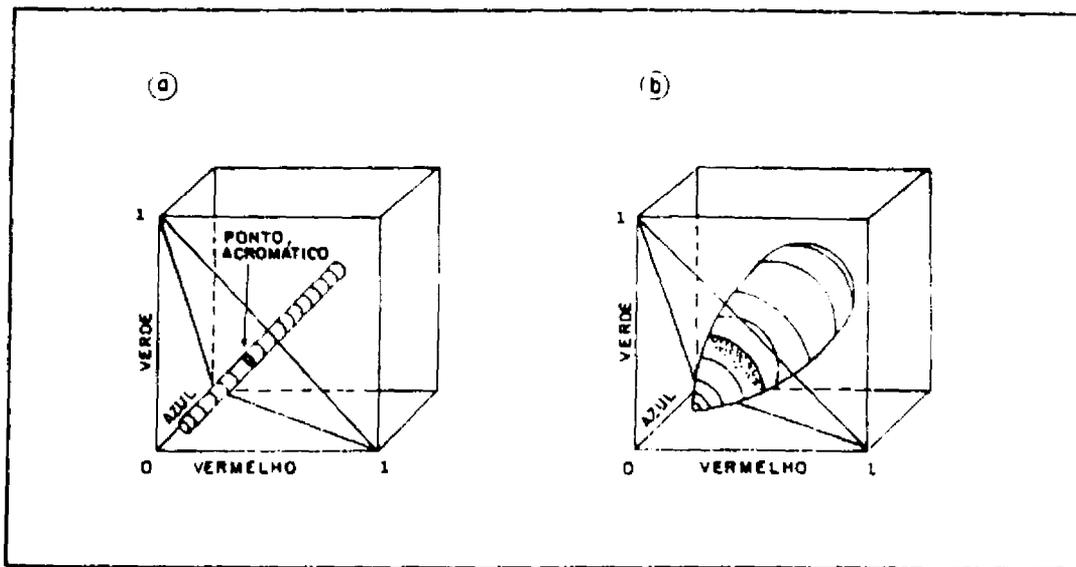


Fig. 3.5 - Representação esquemática da distribuição de dados em três dimensões no cubo RGB.

FONTE: Gillespie et al. (1986).

a) Dados fortemente correlacionados, b) Dados fracamente correlacionados.

Uma restrição à análise da matriz de variância-covariância é que ela somente descreve a forma global dos dados e não a posição relativa dos agrupamentos de classe (Canas and Barnett, 1985). Para isso desenvolveram-se métodos de estatística divergente que estabelecem o afastamento estatístico para diversos grupos de classe (Li, 1982). Embora esses métodos de seleção de atributos tenham sido muito empregados principalmente em trabalhos ecológicos, na Geologia preocupa-se mais com diferenças entre grandes unidades não-homogêneas, cuja a classificação depende mais do reconhecimento de um padrão complexo de atributos espaciais do que de suas reflectâncias espectrais (Greenbaum, 1987). Por isso, para a seleção de bandas espectrais visando a interpretação fotogeológica, sugere-se a utilização de métodos globais como os propostos por Chaves et alii (1982) e Sheffield (1985).

Chaves et alii (1982) propuseram ordenar tripletos ótimos de razões de bandas, segundo a magnitude do Fator de Índice Ótimo - FIO, definido como resultado da divisão da soma dos desvios padrões de 3 bandas pela soma em valor absoluto dos coeficientes de correlação para as mesmas bandas. A mais alta informação ao lado da menor quantidade de duplicação estará contida no subconjunto com maior FIO, ou seja:

$$FIO = \frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_i}{\sum_{j=1}^3 |CC_j|} \quad (3.3)$$

onde: σ é o desvio padrão da banda e $|CC_j|$, o valor absoluto do coeficiente de correlação entre 2 bandas.

O método de Sheffield (1985) baseia-se no cálculo do volume do elipsóide formado pela distribuição da função de probabilidade tridimensional. Este volume é dado por $4\pi abc/3$; onde a, b e c são os principais eixos do elipsóide, o que o faz proporcional ao produto dos autovalores. Esse produto também é igual ao determinante de uma submatriz 3 por 3, obtida da matriz de variância-covariância original n por n. Como o método seleciona um elipsóide com volume máximo, dados fortemente correlacionados produzirão, pelo menos, um dos autovalores próximo a zero, o que resultará em um elipsóide correspondente com pequeno volume.

Dentro ainda da abordagem de seleção de bandas citam-se George e Dusseault (1986), que desenvolveram um método para estimar os parâmetros de variância e covariância para razões de bandas, baseado na série de expansão de primeira ordem de Taylor. Com isto economiza-se tempo de processamento, selecionando-se pelos métodos descritos anteriormente o subconjunto de razões de bandas potencialmente mais informativas, sem precisar realizar, de início, as razões, pois os parâmetros são calculados a partir da média, variância e covariância das bandas originais (Equações 3.4, 3.5, 3.6 de George e Dusseault, 1986):

$$\text{Var}(x/y) \cong \frac{1}{v^2} \cdot \text{Var}(x) + \frac{u^2}{v^4} \cdot \text{Var}(y) - \frac{2 \cdot u}{v^3} \cdot \text{Cov}(x, y) \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}(x/y, z/w) \cong & \frac{1}{v \cdot \theta} \cdot \text{Cov}(x, z) - \frac{\phi}{v \cdot \theta^2} \cdot \text{Cov}(x, w) - \frac{u}{v^2 \cdot \theta} \cdot \\ & \cdot \text{Cov}(y, z) + \frac{u \cdot \phi}{v^2 \cdot \theta^2} \cdot \text{Cov}(y, w) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\sigma = \frac{\text{Cov}(x/y, z/w)}{\{\text{Var}(x/y) \cdot \text{Var}(z/w)\}^{1/2}} \quad (3.6)$$

Onde: u , v , θ e ϕ são as médias populacionais para as bandas x , y , z e w , respectivamente, e σ é o coeficiente de correlação.

3.5 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O tratamento digital de imagens, de um modo genérico, inclui três partes: pré-processamento, realce e classificação (Schowengerdt, 1983). O primeiro refere-se ao processamento inicial dos dados brutos para calibração com a radiometria da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruídos. O realce de imagens produz uma nova imagem mais fácil de interpretar visualmente, e a classificação leva o processamento digital a um passo além, substituindo a interpretação visual por decisões automáticas do tipo matemático ou estatístico. Como o processo de reconhecimento de unidades geológicas empregado na fotointerpretação é por demais complexo para ser implementado ao nível de decisões computacionais, o interesse deste trabalho se restringe às técnicas de realce digital. Essas técnicas podem também ser agrupadas em dois tipos de transformação: **pontual**, onde um novo nível de cinza resultante depende apenas de cada nível de cinza original; e **pela vizinhança**, que envolve o nível de cinza do pixel a ser transformado e um contexto ou vizinhança ao seu redor (Schowengerdt, 1983).

No primeiro grupo, incluem-se, como as mais utilizadas, as técnicas de manipulação de contraste, razão de bandas, componentes principais, transformação IHS e descorrelação de bandas. O segundo tipo de transformação é representado pelos métodos de realce de borda, destacando-se a técnica de filtragem espacial linear.

Dentre a ampla literatura existente, mencionam-se os trabalhos de Knepper Jr. e Raines (1985) e Blodget et alii (1978) sobre tipos de contrastes para dados geológicos; Podwysocki et alii (1984), quanto à utilização das seguintes razões: TM5/7 para determinação de minerais com bandas de absorção entre 2,1 e 2,5 μm ; TM 3/1, 5/2 para detecção de limonita e TM 3/4 para separação de vegetação e alvos minerais. Aplicações clássicas da técnica de componentes principais podem ser encontradas nos trabalhos de Paradella (1983) e Lees et alii (1985) e descrições das técnicas de descorrelação de bandas e IHS encontram-se, respectivamente, nos trabalhos de Gillespie et alii (1986) e Haydn et alii (1982). Uma aplicação convencional deste último método é descrita por Meneses (1986). Como abordagem alternativa, citam-se Dykstra et alii (1984) e Drury (1984). Dykstra et alii (1984) utilizaram uma composição IHS, associando duas razões de bandas aos componentes H e S e a primeira componente principal ao canal I. Como resultado, foi obtida uma composição que exibisse o realce dos dados espectrais obtido com as razões, aliado ao detalhe espacial produzido pela primeira componente principal. Drury (1984), por sua vez, associou cada componente principal aos canais IHS, conseguindo uma composição onde cada nível de informação estivesse relacionado à habilidade visual de percepção de cores. Para a definição e comparação de filtros espaciais, dentro de um enfoque geológico, mencionam-se os trabalhos

de Moore e Waltz (1983), Hornsby et alii (1984) e Blusson et alii (1984).

CAPÍTULO 4DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Este trabalho baseia-se no realce digital e na interpretação visual de imagens obtidas pelo sensor TM - "Thematic Mapper", a bordo do Landsat-5, (Tabela 4.1). As imagens TM, no formato de fitas magnéticas, foram processadas nos sistemas I-100 da General Electric e Sitim-150 desenvolvido pelo INPE (INPE, 1986). A partir do tratamento digital foram obtidos resultados numéricos, gráficos e imagens realçadas. Etapas de seleção, processamento e avaliação de imagens utilizadas neste trabalho são descritas a seguir (Figura 4.1).

TABELA 4.1

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LANDSAT-5 E SEUS SENSORES

SATELITE LANDSAT-5			
ÓRBITA	CIRCULAR QUASE POLAR HELIOSSÍNCRONA DESCENDENTE		
ALTITUDE	705 Km	CICLO	16 DIAS
DURAÇÃO DA ORBITA		98,9 MINUTOS	
HORÁRIO SOBRE O EQUADOR		9 45 h	
PARÂMETROS DO SENSOR	TM	MSS	
BANDAS	COBERTURA ESPECTRAL		
1	0,45 - 0,52 AZUL	0,5 - 0,6 VERDE	
2	0,52 - 0,60 VERDE	0,6 - 0,7 VERM.	
3	0,63 - 0,69 VERM.	0,7 - 0,8 INFRAV	
4	0,76 - 0,90 INFRAV	0,8 - 1,1 INFRAV	
5	1,55 - 1,75 INFRAV		
6	10,4 - 12,5 TERMAL		
7	2,08 - 2,35 INFRAV		
RESOLUÇÃO ESPACIAL	30m BANDAS 1 a 5 e 7 120m BANDAS 6	82 m	
NÍVEL DE QUANTIZAÇÃO	8 bits		6 bits
LARGURA DA FAIXA IMAGEADA	185 Km		185 Km
IFOV	42,5 μ rad		86 μ rad

FONTE: Engel e Weinstein (1983).

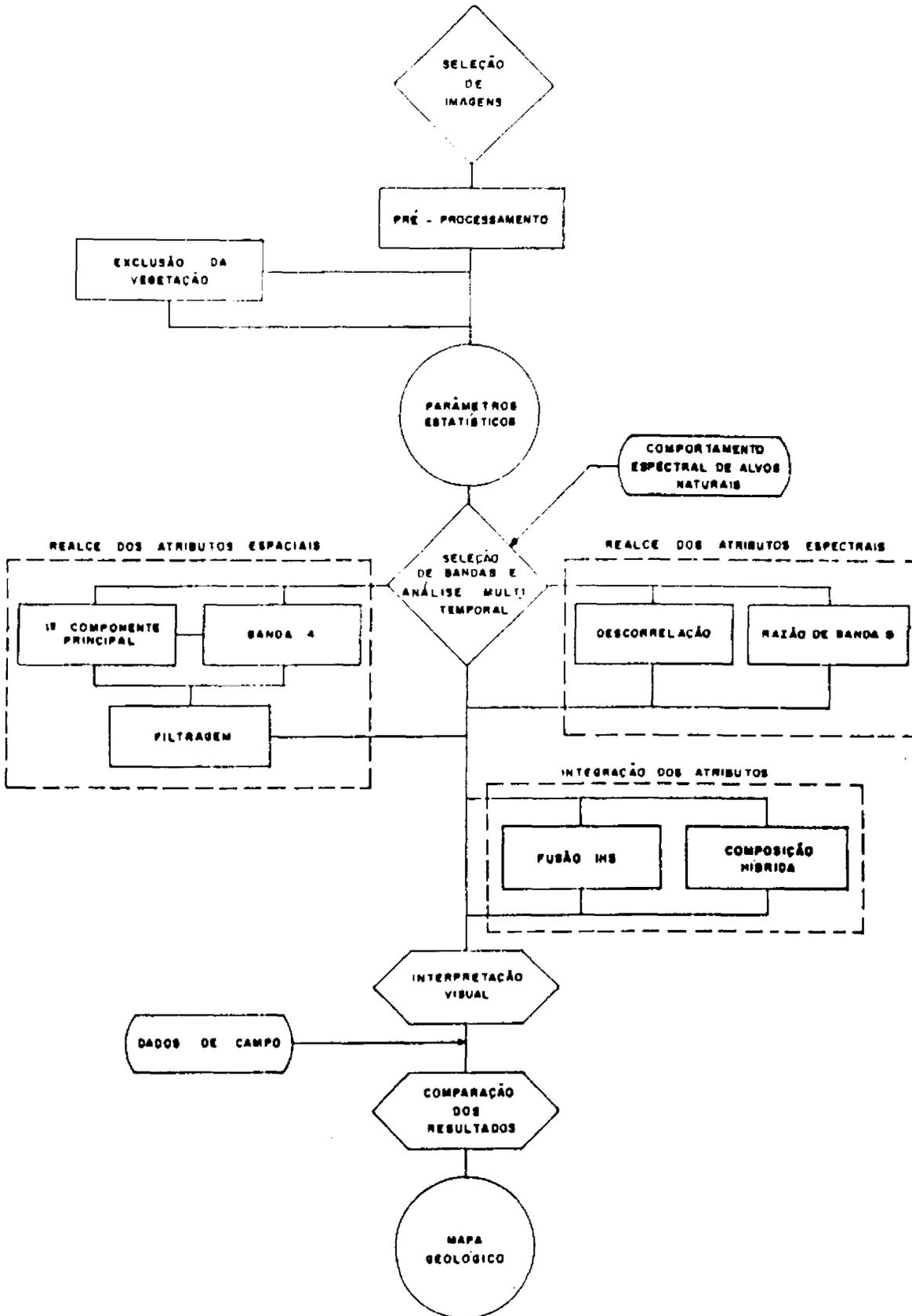


Fig. 4.1 - Fluxograma simplificado do desenvolvimento metodológico.

4.1 - SELEÇÃO DE IMAGENS

A seleção de imagens a serem analisadas baseou-se nos seguintes parâmetros: ângulos de elevação e azimute solar; condições climáticas da área de estudo e passagens sem cobertura de nuvens (Figura 2.3).

Para estudo estrutural, imagens com baixo ângulo solar são desejadas devido ao maior realce de textura. Todavia, no tocante à análise espectral, imagens obtidas com alto ângulo solar são preferidas por amenizar os efeitos de sombreamento devido à variação topográfica. Em relação ao ângulo azimutal, estruturas ortogonais a essa direção tendem a ser realçadas, ao contrário das paralelas. Quanto às variações sazonais climáticas, a resposta espectral do conjunto solo-rocha é favorecida na estação seca, enquanto na época chuvosa a diversidade botânica mais pronunciada pode contribuir, por outro lado, como uma resposta indireta do substrato geológico. A partir dessas considerações, foram selecionadas três passagens, órbita-ponto 218/70 D+, nas datas de 13 de setembro de 1985 (elevação solar 50° , azimute 65°), equivalente ao final da estação seca; 15 de outubro de 1985 (elevação solar 56° , azimute 82°), representativa do início da estação de chuvas; e 30 de maio de 1987 (elevação solar 38° , azimute 46°), coincidente com o término do período chuvoso.

4.2 - PRÉ-PROCESSAMENTO

Imagens com ruídos foram corrigidas, usando os algoritmos de interpolação de linhas e eliminação de ruídos (INPE, 1986). Para a atenuação do efeito atmosférico, foi utilizado o método mencionado por Chaves

(1988) como "método do mínimo valor do histograma". Este permite a seleção dos níveis de cinza da contribuição atmosférica diretamente do histograma da imagem original. Da leitura do histograma numérico de cada banda, obtêm-se os níveis de cinza procurados, excluindo-se os baixos valores produzidos por ruídos espúrios, que são reconhecidos pela sua baixa frequência. Uma restrição a esse método é a suposição de que em uma imagem de satélite com elevado número de pontos, pelo menos alguns "pixels" devam ser pretos (N.C.=0), o que talvez não aconteça em regiões muito planas, sem cobertura de nuvens ou ausentes de corpos d'água. Mas, como numa análise de fotointerpretação interessa-se mais pela qualidade visual, o importante é deslocar os histogramas das bandas para a origem, o que foi satisfatoriamente alcançado pelo método acima citado.

4.3 - EXCLUSÃO DA VEGETAÇÃO

Como interessa-se, a princípio, enfatizar a resposta de solos e rochas, realizou-se a exclusão de "pixels" que representassem, preponderantemente, a classe vegetação. Esse processo assegura resultados estatísticos mais significativos entre contrastes de solos e rochas, uma vez que, em regiões com significativa cobertura vegetal, os métodos globais de seleção de bandas não mostram um valor indicativo das melhores bandas para uma discriminação litológica direta, a menos que se exclua a contribuição da vegetação do cômputo estatístico dos dados.

Essa técnica auxilia, inclusive, a aplicação de realces mais apropriados à separação visual de tipos de solos e rochas, como nos exemplos de obtenção de matrizes

de rotação e ampliação de contraste em histogramas excluindo-se o tema vegetação.

Um método para exclusão da vegetação, semelhante ao proposto por Knepper Jr. e Raines (1985), consiste na classificação da vegetação no canal H (Hue) após uma transformação IHS de uma composição original RGB. Neste trabalho aplicou-se esse método utilizando os canais TM4, TM3, TM5, nessa ordem. "Pixels", majoritariamente representativos da vegetação verde nessa composição, são reconhecidos pelo matiz vermelho, o qual corresponde a um certo intervalo de H.

Uma preocupação inicial, antes da aplicação desse método, foi o posicionamento do centro de agrupamento dos dados sobre o ponto acromático do diagrama de cromaticidade (Figuras 3.4 e 3.5), o que pôde ser obtido com a padronização dos dados. Outra dificuldade refere-se à seleção de um limiar para definição da máscara de exclusão. Para a região em estudo, esse limiar deve representar uma certa percentagem de cobertura vegetal, pois nesse contexto a imagem sempre indicará uma resposta de reflectância de misturas em várias proporções de vegetação-solo-rocha.

4.4 - SELEÇÃO DE BANDAS E ANÁLISE MULTITEMPORAL

Inicialmente, calcularam-se os parâmetros estatísticos para as bandas dos conjuntos de imagens: média, variância, histogramas gráficos, matrizes de variância-covariância e coeficientes de correlação. A exclusão da vegetação só foi realizada para a imagem da época seca, pois para as outras interessava a contribuição da vegetação. Com esses resultados gráficos e numéricos, fez-se a avaliação preliminar dos dados, comparando,

assim, o conteúdo de informação das imagens multissazonais e os das imagens com a exclusão da vegetação, segundo os métodos de Chaves et alii (1982) e Sheffield (1985), os quais foram utilizados para a seleção dos melhores tripletos de bandas.

Numa segunda etapa, foi avaliado o potencial de informação geológica das imagens multitemporais comparando visualmente a mostra dos atributos espectrais entre o primeiro triplete ordenado para cada uma das passagens. Em seqüência, os melhores subconjuntos da passagem escolhida na etapa anterior foram descritos e comparados entre si quanto à exibição dos níveis de informação.

Por fim, calcularam-se os parâmetros estatísticos de razões de bandas pelo método de George e Dusseault (1986), para seleção dos tripletos de razões (método de Sheffield, 1985) a serem implementados na etapa de realce digital.

4.5 - SEQUÊNCIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL

O processo de interpretação fotogeológica baseia-se no reconhecimento de ambos os atributos espectrais e espaciais. Como esse processo é algo complexo, torna-se interessante o realce à parte de cada tipo de atributo, para a posterior integração dos resultados. O padrão e arranjo dos elementos de textura são mais facilmente extraídos de imagens monocromáticas, devido à melhor resposta da percepção visual às altas taxas de frequência espacial em preto e branco (Drury, 1986), ao passo que os atributos espectrais são melhor visualizados em composições coloridas.

A apresentação em conjunto de diversos tipos de dados pode, em alguns casos, dificultar a fotointerpretação do dado de interesse. Uma solução para isso é o emprego da técnica de segmentação, que utiliza uma máscara sobre a composição analisada. No caso, "pixels" pertencentes à classe vegetação aparecem em preto (N.C. = 0), o que facilita a compreensão do intérprete quanto ao significado das cores, agora somente relacionadas a solos e rochas.

A técnica utilizada para o realce dos atributos espaciais foi a filtragem linear, aplicada na primeira componente principal que tem a relação sinal ruído aumentada em relação às bandas originais (Drury, 1984), e na banda 4. Esta, por ser mais homogênea em relação ao contraste tonal entre a cobertura vegetal e o conjunto solo-rocha, facilita a observação do intérprete para a variação topográfica (Moore e Waltz, 1983).

Para o realce dos atributos espectrais foram utilizadas composições da passagem escolhida, definidas pelos métodos de seleção de bandas e empregadas técnicas de razões, transformação IHS e descorrelação de bandas. Desta fase foi excluída a técnica de componentes principais, tendo em vista apresentar um desbalanceamento da quantidade de informação distribuída entre os canais de baixa e alta ordens (Feng, 1985) e atributos de cores dependentes dos dados da cena, o que dificulta o reconhecimento de materiais em função de suas propriedades espectrais inferidas dos padrões de cores (Sheffield, 1985). As técnicas IHS e descorrelação de bandas são empregadas para criar composições com cores mais saturadas. Como a comparação entre estes dois métodos mostrou que a segunda técnica alcança melhores resultados,

ater-se-á neste trabalho somente à descrição de seus resultados.

Após as etapas acima, os vários produtos foram avaliados e selecionados para a interpretação visual e integração dos atributos espaciais e espectrais. Para tanto, foram testadas composições híbridas e fusão IHS. Este último processo foi usado para criar uma composição que reunisse a melhor representação dos atributos espaciais, via canal I, com imagens de maior potencial de discriminação espectral, associadas aos canais H e S.

4.6 - FOTOINTERPRETAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

As composições classificadas pelos métodos numéricos de seleção de bandas, juntamente com as melhores imagens obtidas pelas técnicas de realce, foram reproduzidas em fotografias e interpretadas criteriosamente.

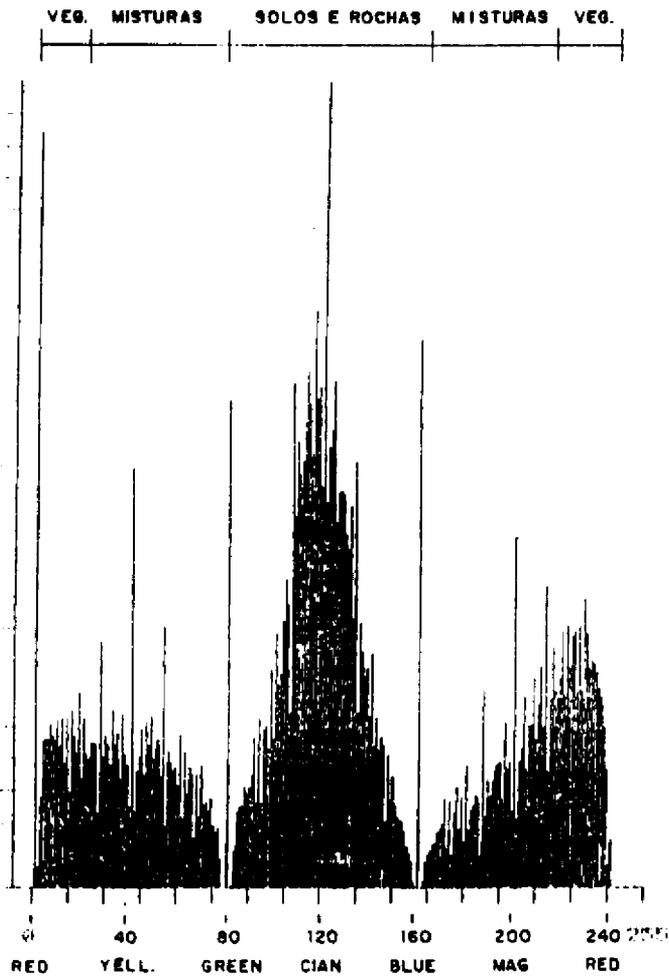
A carta fotogeológica obtida foi comparada com dados de campo e mapas prévios, com o intuito de avaliar e classificar cada composição selecionada, no tocante ao seu potencial de discriminação litológica e/ou estrutural. Assim, avaliou-se também a eficácia dos métodos teóricos de seleção de bandas. Por último, fez-se uma integração dos resultados, de onde foram tirados os comentários e inferências sobre a geologia da área em questão.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - EXCLUSÃO DA VEGETAÇÃO

Da análise do histograma de níveis de cinza do canal H (matiz), gerado a partir da composição 4R3G5B, dados padronizados, época seca, foram definidos limiares para o emprego da técnica de fatiamento de nível de cinza no estabelecimento de duas máscaras de exclusão da vegetação. A primeira máscara foi selecionada nos intervalos de 0 a 15 e 216 a 241, que correspondem às faixas do matiz vermelho, o qual caracteriza a vegetação verde nessa composição, como explicado pelo seu comportamento espectral (Figura 5.1). A definição dessa máscara correspondeu à classificação do equivalente a 11% da área do módulo de estudo como classe de vegetação verde (Figura 5.2). Para a segunda máscara de exclusão, foram escolhidos os intervalos 0-79 e 161-241, tomando como base a interpretação do histograma de H. Do tipo bimodal, ele teria os extremos representados pela classe de vegetação e a porção em torno da moda central, pela classe de solo-rochas. Ainda, os intervalos intermediários seriam característicos de misturas entre essas duas classes (Figura 5.1). Este último limiar resultou na classificação de 52% da área do módulo de estudo como classe de solo-rochas e 37% como classe de mistura (Figura 5.3).



CANAL = 2
 NIVEL MINIMO DE CINZA = 1
 NIVEL MAXIMO DE CINZA = 241
 FREQUENCIA MAXIMA NA ESCALA VERTICAL = 4020.00
 EIXO VERTICAL = FREQUENCIA DE REPETICAO DOS NIVEIS DE CINZA
 EIXO HORIZONTAL = NIVEIS DE CINZA (CADA PONTO CORRESPONDE A UM NIVEL)

Fig. 5.1 - Histograma do canal H, gerado a partir da composição 4R3G5B, dados padronizados de 13.09.85.

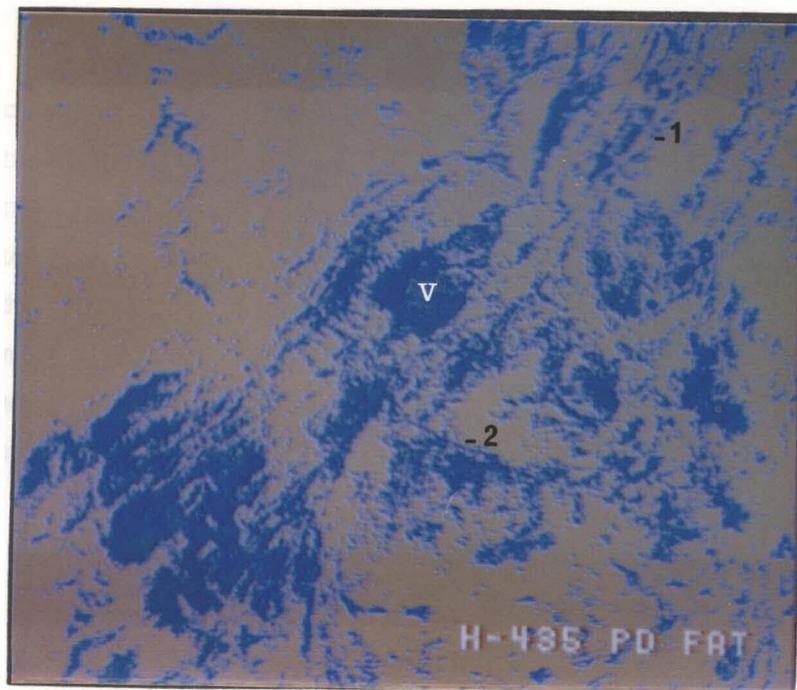


Fig. 5.2 - Máscara de vegetação, primeiro limiar.

- V - máscara de vegetação. Alinhamento de vegetação ao longo de contatos litológicos (1) e fraturas (2).

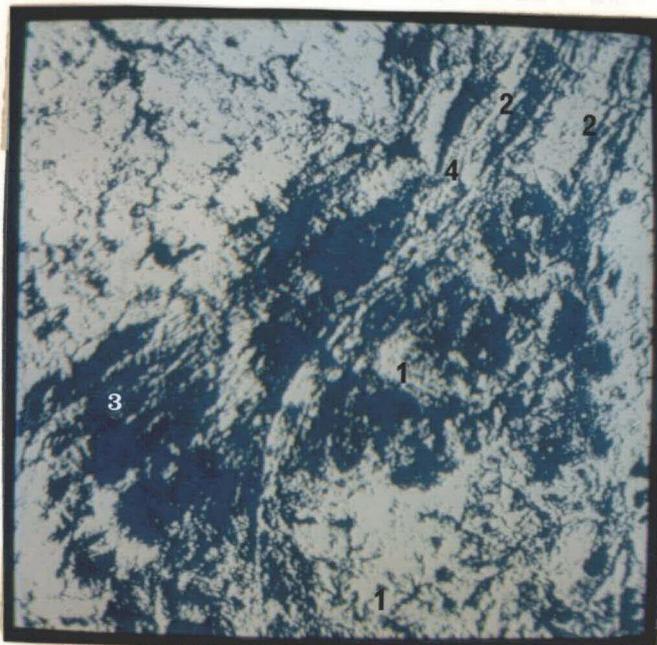


Fig. 5.3 - Máscara de vegetação mais mistura, segundo limiar.

- Classe de solo-rochas aparece em branco. Fraturas (1), contatos litológicos (2), áreas de ocorrências de filitos (3) e quartzitos (4).

O padrão de distribuição da vegetação verde, tal como classificado por ambas as máscaras, relaciona-se com a geologia da área de estudo, mostrando maior concentração sobre os metapelitos do Espinhaço Superior, ao longo de contatos litológicos, fraturas, vertentes mais sombreadas e cursos d'água; em geral, áreas com maior umidade no solo. Ambas as porções do embasamento apresentaram-se mais livre da influência da vegetação, como explicado pela sua cobertura de caatinga. De um modo geral, a máscara definida pelo segundo limiar exibiu detalhes mais finos da configuração geológica da área em estudo, indicando que esse tipo de classificação, quando empregado na imagem da época seca, é útil à fotointerpretação de feições litológicas e estruturais (Figura 5.3).

Uma restrição a esta análise de distribuição da cobertura vegetal refere-se ao envolvimento de somente dois componentes de mistura, ou seja, a vegetação verde e a área de exposição de solos e rochas. Como descrito na Seção 3.2, a vegetação seca exerce ainda um efeito de sombreamento sobre o substrato geológico, sendo esse efeito proporcional ao porte da vegetação. Como observado em campo, áreas não-classificadas como vegetação e discriminadas nas imagens da época seca por apresentarem uma baixa reflectância, principalmente nas bandas 4 e 5, são constituídas por uma mata de médio porte que embora completamente desfolhada, causa uma absorção da REM, obscurecendo substancialmente a reflectância do conjunto solo-rocha (Figura 5.4). Portanto, considera-se que a percentagem de área obtida para a classe de solo-rochas não implica que essas áreas sejam completamente desprovidas de vegetação, mas sim locais com uma relativa cobertura vegetal numa certa composição e estado

fenológico correspondente ao estágio decidual, onde a sua interferência na resposta espectral do conjunto solo-rocha varia de um mínimo até um máximo, quando chega a causar um forte abaixamento do albedo devido ao seu maior porte.

Quanto à técnica de classificação usada, embora ainda não amplamente testada, pois se observa na literatura a mais freqüente utilização de índices de vegetação (Tucker et alii, 1979), pode se atribuir a ela as vantagens de ser independente das condições de iluminação (característica própria do componente H) e compreender dados de três bandas espectrais diagnósticas da vegetação verde.



Fig. 5.4 - Cobertura vegetal parcialmente seca em solos líticos da Serra do Espinhaço.

A interferência do material lenhoso seco varia de um mínimo (plano de frente) a até uma forte absorção da REM - plano de fundo (julho/1989).

5.2 - ANÁLISE DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

A influência da vegetação verde nos parâmetros estatísticos dos dados TM pode ser compreendida, analisando em primeiro os histogramas de níveis de cinza. A presença em conjunto de ambas as classes de vegetação e de solo-rochas os mostra assimétricos e assintóticos em direção aos valores mais elevados, com exceção da banda 4, que é assintótica em direção aos valores mais baixos. Isto deve-se às reflectâncias mais baixas da vegetação em relação as dos solos e rochas nas bandas do visível, 5 e 7 e inversão desta relação na banda 4. Este efeito é mais pronunciado nas imagens de 15/10/85 e 13/09/85, que são características de uma maior gama de misturas entre as classes em questão (Figuras 5.5 e 5.6). Histogramas da classe de solo-rochas são, por sua vez, mais simétricos e em geral mais espalhados (Figura 5.7).

Numa segunda etapa, matrizes de variância-covariâncias das bandas TM foram obtidas para as três passagens diferentes, inclusive as imagens da época seca com exclusão dos "pixels" classificados pelas máscaras obtidas pelo processo de fatiamento do canal H (vegetação - primeiro limiar e vegetação mais mistura -segundo limiar). Ver Tabela 5.1.

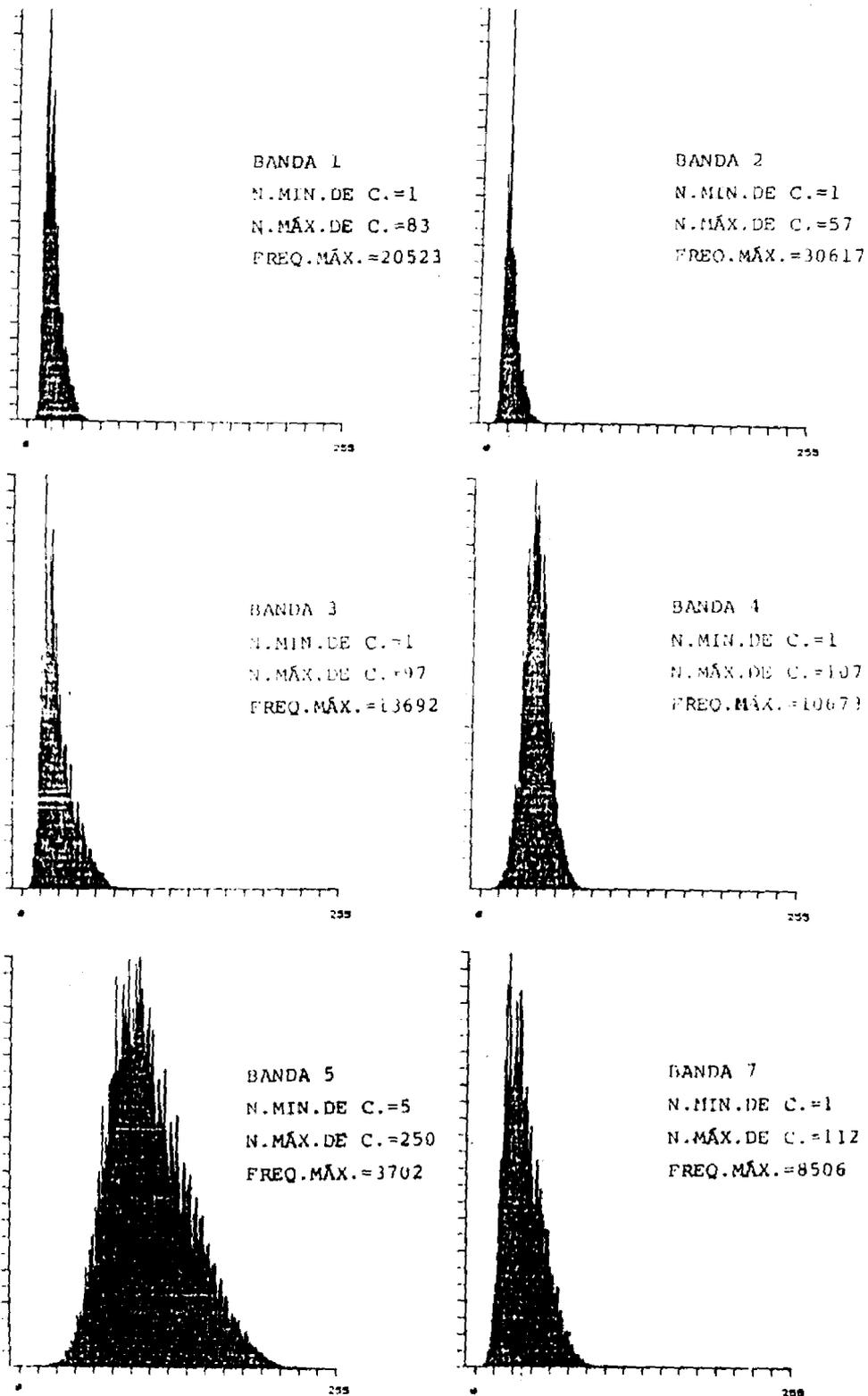


Fig. 5.5 - Histogramas de bandas TM da imagem de 13.09.85, após correção atmosférica.

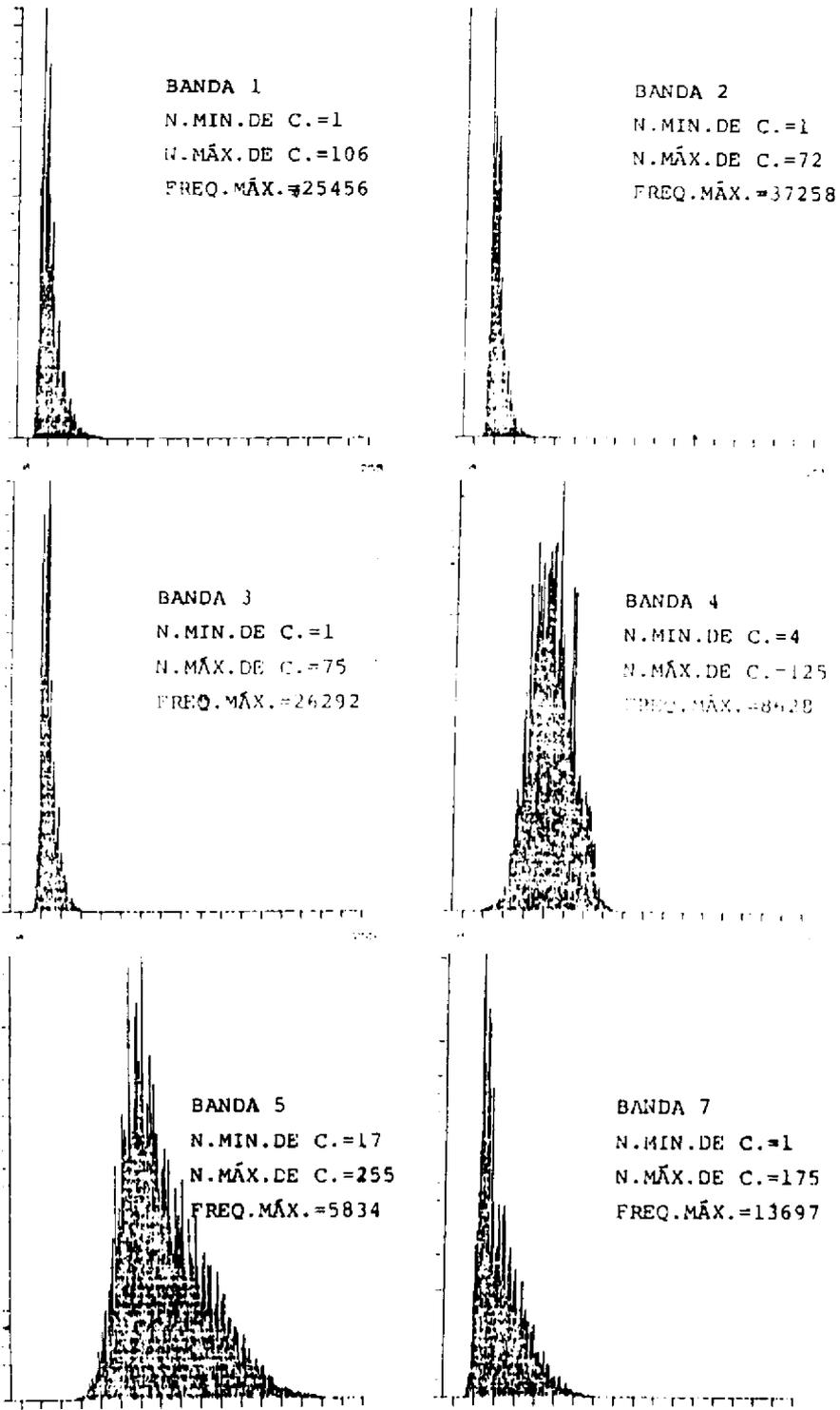


Fig. 5.6 - Histogramas de bandas TM da imagem de 15.10.85, após correção atmosférica.

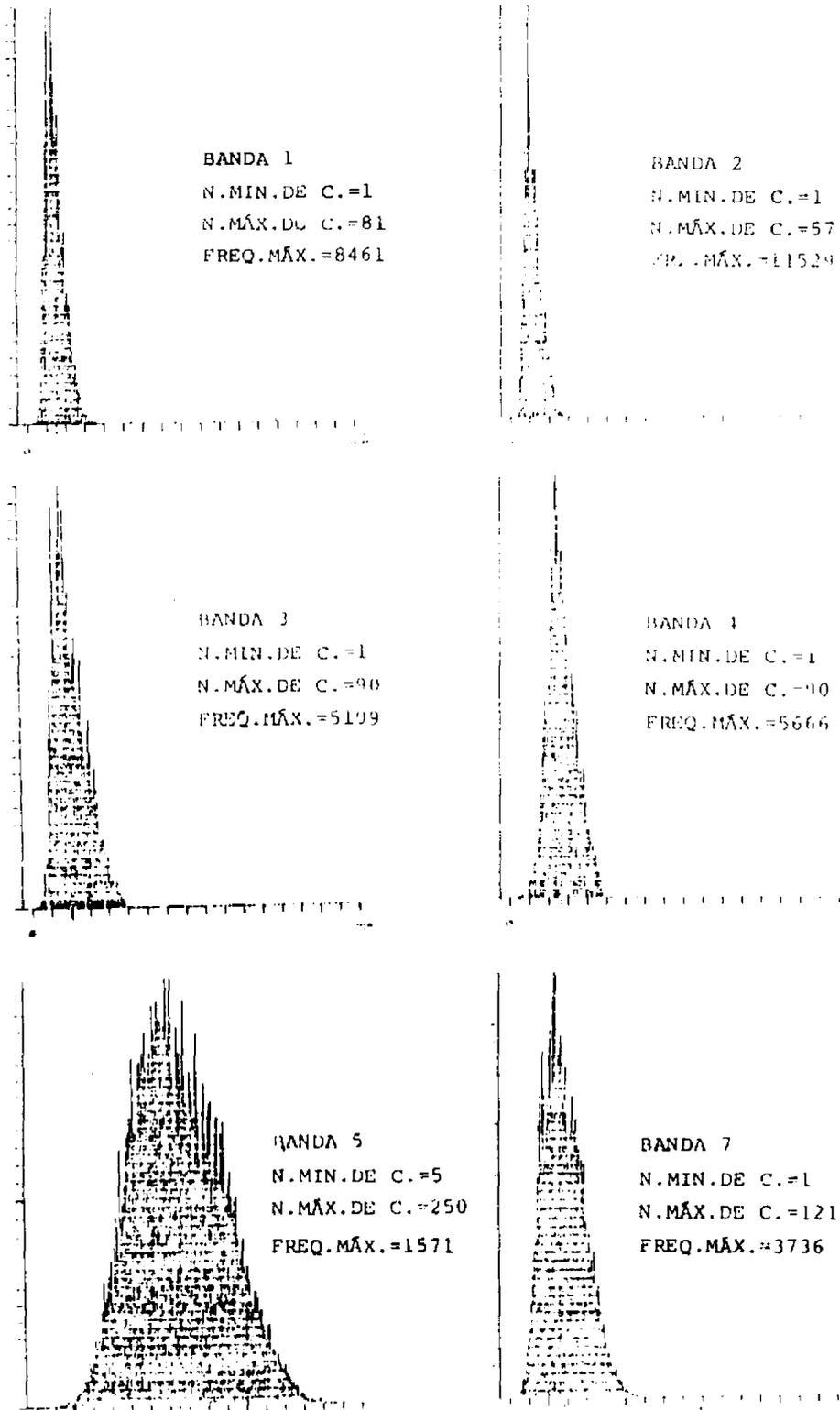


Fig. 5.7 - Histogramas do tema "solos e rochas" (imagem de 13.09.85, com exclusão da vegetação, segundo li limiar).

TABELA 5.1

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS PASSAGENS SELECIONADAS E IMAGENS COM EXCLUSÃO DA VEGETAÇÃO

13/09/85 - Imagem Total							13/09/85 - Vegetação 1º Limiar							13/09/85 - Vegetação 2º Limiar							15/09/85 - Total							30/05/87 - Total						
Tm1	Tm2	Tm3	Tm4	Tm5	Tm6	Tm7	Tm1	Tm2	Tm3	Tm4	Tm5	Tm6	Tm7	Tm1	Tm2	Tm3	Tm4	Tm5	Tm6	Tm7	Tm1	Tm2	Tm3	Tm4	Tm5	Tm6	Tm7	Tm1	Tm2	Tm3	Tm4	Tm5	Tm6	Tm7
20,23	16,26	27,76	43,27	104,92	37,86		21,77	17,42	30,64	42,73	109,58	40,47	22,39	17,64	31,58	40,25	112,89	42,51	15,98	16,85	20,22	62,83	106,6	33,62	14,74	12,65	16,50	38,89	67,23	19,67				
Variância-Covariância							Variância-Covariância							Variância-Covariância							Variância - Covariância													
53,05	41,76	83,21	52,08	198,7	93,93		57,46	46,41	88,24	72,94	229,5	105,71	61,96	39,27	80,38	5,82	201,38	111,0	29,41	21,10	36,46	21,52	98,29	44,39	18,25	32,56	20,46	79,89	35,78					
37,99	73,88	50,38	173,5	81,39			42,96	81,10	67,56	208,3	95,38		31,17	55,55	19,49	141,7	73,94		18,25	32,56	20,46	79,89	35,78		64,44	31,87	150,3	68,66						
156,1	97,80	357,2	166,5				164,7	136,0	415,9	187,2			121,07	-15,7	290,6	163,2			18,25	32,56	20,46	79,89	35,78		80,77	118,9	40,05							
116,5	253,8	105,2					126,7	318,0	135,7				228,7	24,7	-36,3				64,44	31,87	150,3	68,66			80,77	118,9	40,05							
10,35	456,0						1132	489,2					908,4	456,7					80,77	118,9	40,05				80,77	118,9	40,05							
$\Sigma^2 = 1619,8$							$\Sigma^2 = 1757,8$						$\Sigma^2 = 1874,9$						$\Sigma^2 = 1615,7$						$\Sigma^2 = 774,0$									
Coef. de Correlação							Coef. de Correlação							Coef. de Correlação							Coef. de Correlação													
1,00	0,93	0,91	0,66	0,85	0,87		1,00	0,93	0,91	0,86	0,66	0,87	1,00	0,89	0,93	-0,05	0,85	0,87	1,00	0,91	0,91	0,44	0,82	0,86	1,00	0,91	0,91	0,44	0,82	0,86				
1,00	0,96	0,76	0,87	0,89			1,00	0,96	0,92	0,91	0,91		1,00	0,90	0,90	0,23	0,84	0,81	1,00	0,95	0,95	0,53	0,85	0,88	1,00	0,95	0,95	0,53	0,85	0,88				
1,00	0,72	0,89	0,90				1,00	0,94	0,92	0,91			1,00	-0,09	0,88	0,91			1,00	0,44	0,85	0,90			1,00	0,44	0,85	0,90						
1,00	0,73	0,66					1,00	0,84	0,79				1,00	0,93	0,89				1,00	0,60	0,47				1,00	0,60	0,47							
$\Sigma CCijf = 12,55$							$\Sigma CCijf = 13,10$						$\Sigma CCijf = 13,68$						$\Sigma CCijf = 9,38$						$\Sigma CCijf = 11,35$									
NP de Pontos Comp. = 239.844							NP de Pontos Comp. = 213.855						NP de Pontos Comp. = 124.672						NP de Pontos Comp. = 258.788						NP de Pontos Comp. = 258.788									

Pela comparação entre as variâncias de cada imagem, observam-se maiores valores para a banda 5, seguida da banda 7 e por último, com menores valores, a banda 2. Nessa análise, deve-se considerar que o valor deste parâmetro é influenciado tanto pela especificação do ganho por banda do sensor, quanto pelos dados da cena imageada. Visualmente, uma maior variância de bandas originais significa maior contraste e preservação de finos detalhes espaciais.

Com a exclusão progressiva das classes de vegetação e de mistura (primeiro e segundo limiares), verifica-se uma tendência de crescimento da variância (Figura 5.8). Comparando imagens de diferentes épocas, observa-se, também, um decréscimo do somatório das variâncias, proporcional ao desenvolvimento da estação chuvosa. A imagem de 15/10/85 apresenta uma exceção à tendência de decréscimo das variâncias por bandas individuais, nas bandas 1, 4 e 7. Equivalendo ao início da estação chuvosa, essa imagem representa uma situação de misturas em diversas proporções entre as duas classes em questão, devido às fases de emergência e de crescimento diferencial da vegetação, comuns nessa época do ano. Por conseguinte, a maior variância obtida na banda 4 explica-se pela sua alta sensibilidade à variação de densidade vegetal. Ao passo que a banda 7 pode ter sido influenciada pelo maior conteúdo de umidade presente no solo e na vegetação. Os menores valores de variâncias são encontrados para a imagem de 30/05/87, fato que pode estar relacionado ao maior grau de homogeneidade espectral alcançado pelas comunidades botânicas nesse estágio sazonal.

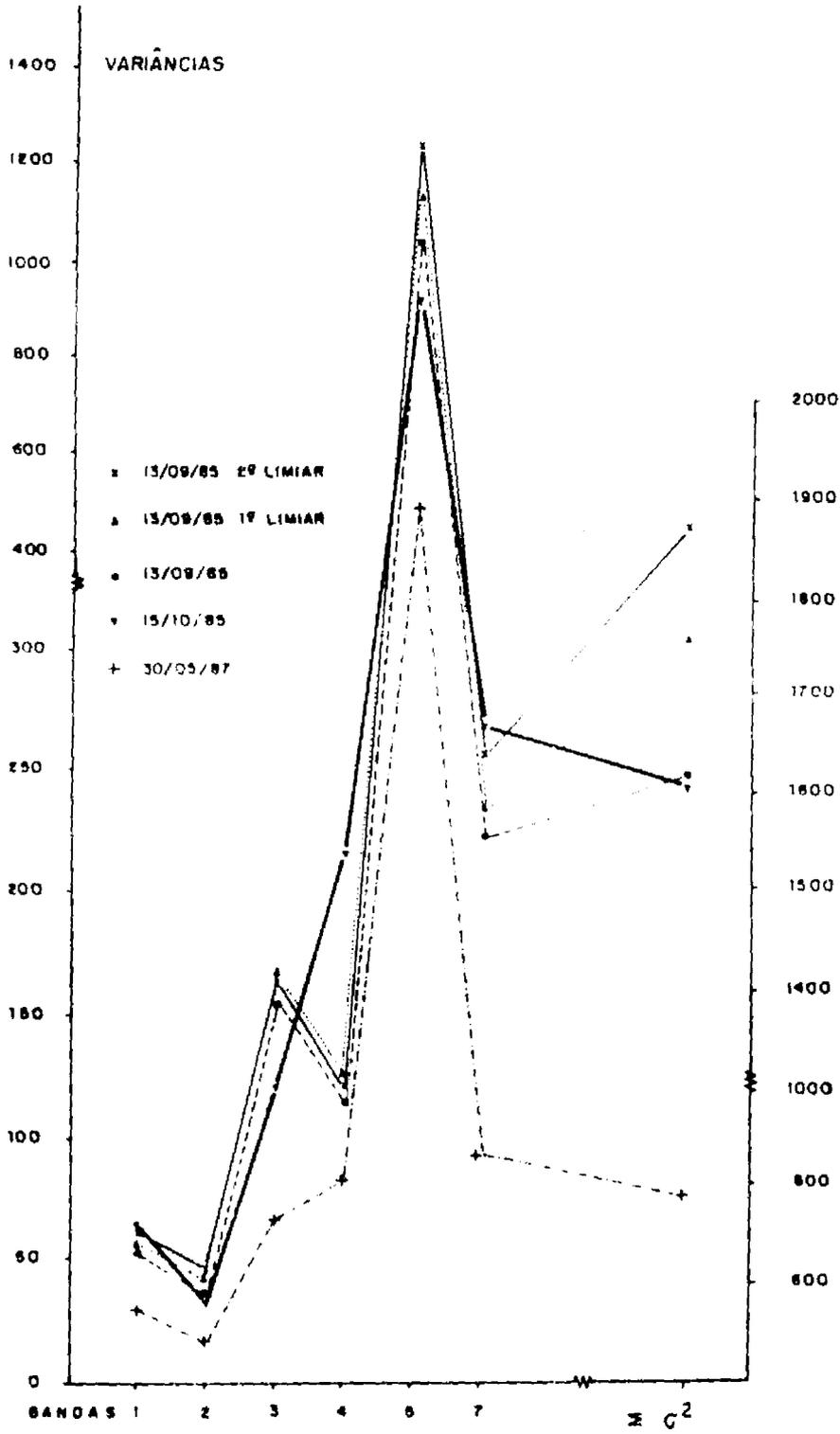


Fig. 5.8 - Variância de bandas TM para os cinco conjuntos de imagens.

Quanto às condições de iluminação, reconhece-se que o decréscimo do ângulo de elevação solar influencia positivamente as variâncias de bandas individuais, como é demonstrado pela maior amplitude dos valores de co-senos de ângulos de incidência - medidos em relação à normal de cada elemento de resolução do terreno (Figura 5.9). Todavia, este efeito não é suficiente para inverter a tendência da componente relacionada à variação sazonal da cobertura vegetal, como comprovado pelos dados da imagem de 30/05/87.

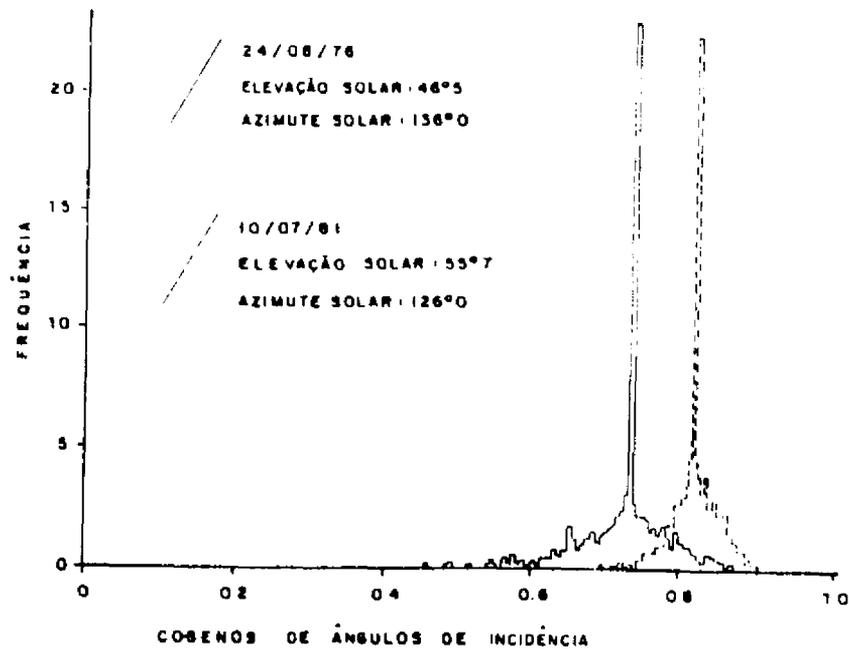


Fig. 5.9 - Histogramas de co-senos de ângulos de incidência de imagens multitemporais.

FONTE: Cavayas (1987).

Da análise dos coeficientes de correlação, observa-se que as subtrações das classes de vegetação e de mistura da imagem da época seca acarretam um aumento dos coeficientes de correlação, sendo esse efeito bastante notável na banda 4 em relação às demais, sobretudo nos pares 1-4, 3-4, 4-7. Esse aumento é justificado pela forma mais plana - ausente de bandas pronunciadas de absorção - das curvas espectrais de solos e rochas. Já os índices de correlação menos sensíveis à influência da exclusão da classe vegetação são os pares 1-3, 1-7, 3-7 e 5-7. Com exceção da banda 4 para os dados sem exclusão da vegetação, pares de bandas mais próximas no espectro tendem a ser mais correlacionados. E, numa comparação global, as menores correlações encontradas pertencem ao conjunto de imagens de 15/10/85, seguidas pelo conjunto de 30/05/87 e por último os de 13/09/85 (Figura 5.10).

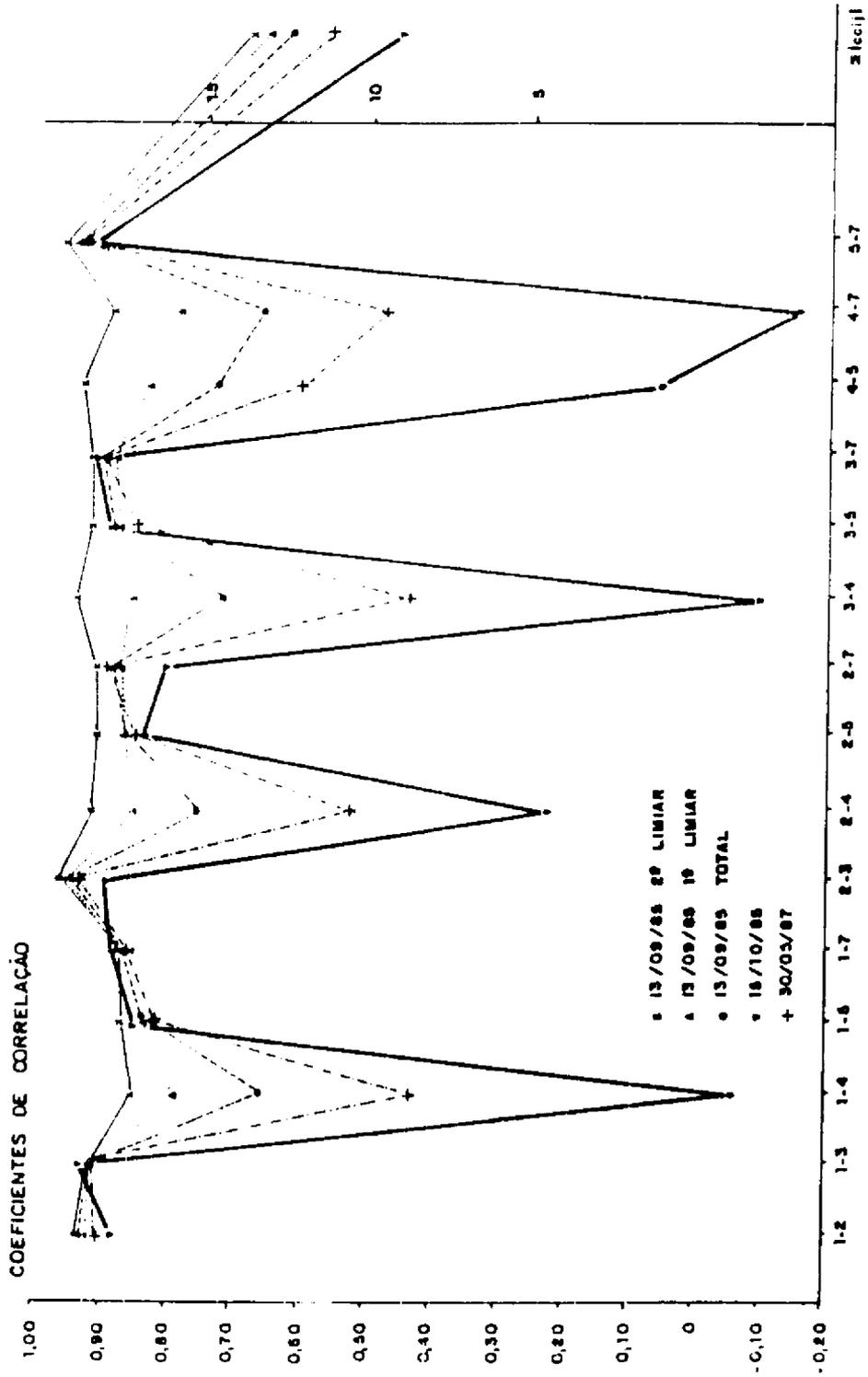


Fig. 5.10 - Coeficientes de correlação de pares de bandas das 5 imagens.

Como a vegetação verde exibe comportamento espectral inverso entre as bandas 3 e 4, dever-se-ia esperar um índice de correlação negativo para esse par em imagens compostas predominantemente por essa classe. Isto não ocorre na imagem de 30/05/87, devido principalmente ao efeito da componente ligada ao ângulo de iluminação solar sobre o coeficiente de correlação. De tendência positiva e crescente inversamente proporcional ao ângulo de elevação solar, esta componente torna positiva a correlação entre essas bandas devido a maior variação das condições de iluminação e extensão de áreas sombreadas provocadas pelo baixo ângulo de elevação solar, sobretudo quando as suas variâncias não forem pronunciadas devido à homogeneidade espectral entre as classes de cobertura, a exemplo dessa passagem (Figura 5.11).

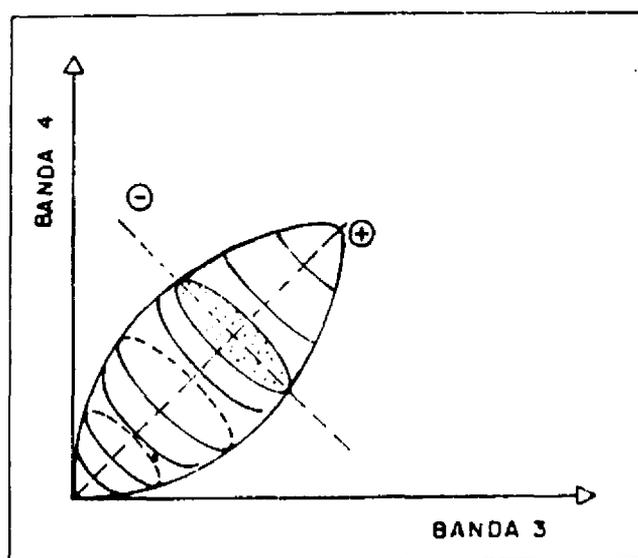


Fig. 5.11 - Inversão do coeficiente de correlação, devido à componente de iluminação solar.

5.3 - SELEÇÃO E ANÁLISE DE IMAGENS

5.3.1 - SELEÇÃO DE BANDAS E ANÁLISE DO CONTEÚDO DE INFORMAÇÃO

Como um monitor colorido utiliza três bandas espectrais, optou-se pela seleção de subconjuntos de bandas nessa dimensão, no total de 100 para as três passagens, incluindo os dois conjuntos de imagens com exclusões das classes de vegetação e de vegetação mais mistura (Tabela 5.2). Os métodos de seleção de Chaves et alii (1982) e de Sheffield (1985) foram aplicados, obtendo-se uma convergência em relação aos melhores resultados. Os três primeiros tripletos classificados para cada conjunto de imagens se equivaleram em ambos os métodos, alterando-se apenas a ordem entre eles. E ainda, dentre os cinco primeiros, houve apenas três resultados divergentes (Tabela 5.3). Em relação aos conjuntos de imagens de 30/05/87, 15/10/85 e 13/09/85-total, os melhores tripletos classificados pelo método de Sheffield (1985) foram 3-4-5, 4-5-7 e 1-4-5. Enquanto, para as imagens com exclusão da classe vegetação, notou-se uma tendência de substituição progressiva da banda 4 pela a 7, com o aumento dos limiares de fatiamento do canal H. Essa maior importância da banda 7, como evidenciada pelos métodos, no mapeamento de solos e rochas, deve-se possivelmente à presença de diversas bandas de absorção mineral nessa faixa do espectro (2100-2500 nm) e à sua maior sensibilidade a variações de umidade e textura de solos. A banda 5 faz parte de todas as composições selecionadas, devido principalmente à sua desproporcional variância e a banda 4, devido ao fato de exercer um papel principal no mapeamento de densidades de cobertura

vegetal, entra nas composições das imagens sem as exclusões das classes de vegetação e de mistura.

TABELA 5.2

RESULTADOS DOS MÉTODOS DE SELEÇÃO DE BANDAS

FIO (MÉTODO DE CHAVEZ ET ALII, 1982)					
BANDAS	13/09 Total	13/09 1º Lim	13/09 2º Lim	15/10/85	30/05/87
1-2-3	9,3	9,6	9,6	9,0	6,4
1-2-4	10,3	9,8	9,4	24,4	9,9
1-2-5	17,2	18,0	18,2	16,9	12,3
1-2-7	10,5	11,0	11,1	11,6	7,3
1-3-4	13,3	12,4	11,7	31,8	12,5
1-3-5	19,6	20,6	20,6	18,4	13,8
1-3-7	12,9	13,5	13,5	13,0	8,6
1-4-5	29,5	21,2	20,3	55,9	19,6
1-4-7	15,0	13,9	13,3	36,7	13,5
1-5-7	20,3	21,3	21,2	20,5	14,2
2-3-4	12,1	11,5	10,9	26,0	11,1
2-3-5	18,7	19,6	19,5	17,8	13,0
2-3-7	12,2	12,8	12,7	12,5	8,0
2-4-5	20,8	20,0	19,1	45,4	17,9
2-4-7	13,8	13,0	12,4	31,1	12,1
2-5-7	19,6	20,5	20,7	20,1	13,5
3-4-5	23,7	22,4	21,2	55,2	20,7
3-4-7	16,7	15,6	14,6	36,9	14,7
3-5-7	21,8	22,8	22,4	21,1	14,8
4-5-7	24,7	23,3	22,4	54,4	20,23

DETERMINANTE (MÉTODO DE SHEFFIELD, 1985)					
BANDAS	13/09 Total	13/09 1º Lim	13/09 2º Lim	15/10/85	30/05/87
1-2-3	3210	3861	3642	5221	521
1-2-4	13076	9936	6148	55496	5210
1-2-5	63379	84786	68105	86617	12206
1-2-7	11956	15318	13259	24715	1744
1-3-4	74814	52012	22737	233270	21720
1-3-5	283970	403740	293693	210839	44618
1-3-7	54946	76308	65777	45373	5688
1-4-5	826290	641184	274312	3470366	244187
1-4-7	181376	143084	80276	884917	44268
1-5-7	270600	347126	332962	461957	42119
2-3-4	23376	15843	6703	69627	6310
2-3-5	99154	132161	87532	136733	15155
2-3-7	19484	24952	19314	30453	1995
2-4-5	435932	326378	120072	1658934	132467
2-4-7	88120	67513	32810	388573	22039
2-5-7	161400	212398	169848	281095	22463
3-4-5	1732507	1233454	313844	5316638	456149
3-4-7	375759	268414	90696	1191244	72483
3-5-7	602136	818365	569150	624418	69018
4-5-7	1093534	885955	422248	5066953	252850

TABELA 5.3

MELHORES COMPOSIÇÕES SELECIONADAS

MÉTODO DE SHEFFIELD (1985)					
13/09- 2º Lim	3-5-7	4-5-7	1-5-7	3-4-5	1-3-5
13/09- 1º Lim	3-4-5	4-5-7	3-5-7	1-4-5	1-3-5
13/09/ Total	3-4-5	4-5-7	1-4-5	3-5-7	2-4-5
15/10	3-4-5	4-5-7	1-4-5	2-4-5	3-4-7
30/05	3-4-5	4-5-7	1-4-5	2-4-5	3-4-7



Ordem Crescente

MÉTODO DE CHAVEZ ET ALII (1982)					
13/09- 2º Lim	3-5-7	4-5-7	1-5-7	3-4-5	2-5-7
13/09- 1º Lim	4-5-7	3-5-7	3-4-5	1-5-7	1-4-5
13/09/ Total	1-4-5	4-5-7	3-4-5	3-5-7	2-4-5
15/10	1-4-5	3-4-5	4-5-7	2-4-5	3-4-7
30/05	3-4-5	4-5-7	1-4-5	2-4-5	3-5-7



Embora, ambos os métodos tenham apresentado resultados parcialmente concordantes, o método desenvolvido por Sheffield (1985) possui um maior embasamento teórico, pela demonstração de sua convergência com o método da entropia gaussiana. Por isso, ele é mais indicado como medida de conteúdo de informação de imagens multiespectrais. Logo, nessa análise quantitativa, as imagens com maior conteúdo de informação são os subconjuntos 3-4-5, 4-5-7, 1-4-5 da passagem de 15/10/85, seguidos pelos tripletos 3-4-5 das imagens de 13/09/85-total e de 13/09/85- primeiro limiar. A imagem de 13/09/85- segundo limiar apresenta subconjuntos com índices bem mais inferiores e os tripletos da imagem de 30/05/87 possuem os mais baixos índices entre todas as outras (Figura 5.12).

O principal efeito sentido no espaço de atributos de qualquer subconjunto de bandas, devido à subtração da classe vegetação, é o estiramento do volume do elipsóide de informação correspondente, ao longo da linha cinza do cubo RGB (Figuras 3.5 e 5.13). Imagens de solos e rochas são mais heterogêneas (bandas espectrais com maiores variâncias) em função provavelmente da maior irregularidade do terreno, micro e macrorrelevos e variabilidade de albedos desses materiais. Por outro lado, esses dados são fortemente correlacionados ao longo do espectro (400-2500 nm). Isso, na prática, resulta em composições RGB com cores pastéis ou acinzentadas. Ao contrário, a imagem de 30/05/87, equivalente ao final da estação chuvosa, apresenta áreas de vegetação com densidades mais homogêneas. Os volumes de elipsóides obtidos para seus subconjuntos de bandas são os menores entre todas as outras imagens, o que indica que, embora se esperasse uma maior variância acoplada ao componente

intensidade, devido ao mais baixo ângulo de elevação solar, diferentes comunidades botânicas nesse estágio sazonal são espectralmente mais semelhantes.

Os maiores volumes de informação foram obtidos para as imagens de 15/10/85 e 13/09/85 total. Essas imagens representam misturas entre as duas classes em questão, seja na primeira, característica das fases de emergência e de crescimento diferencial da vegetação, ligadas ao início da estação de chuvas, ou na segunda, obtida na época seca, quando se torna nítida a associação da flora com a umidade do solo. Portanto, desse estudo admite-se que um dos principais fatores botânicos que contribuem para o conteúdo de informação de imagens multiespectrais é o estrutural: densidade de cobertura vegetal, relacionada ou não com a variação taxonômica. Em suma, maior quantidade de proporções de misturas (ou seja, percentagens de recobrimento do solo pela vegetação verde) resulta em um maior conteúdo de informação.

5.3.2 - COMPARAÇÃO VISUAL ENTRE IMAGENS DA ÉPOCA SECA E CHUVOSA EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS ESPECTRAIS

A inclusão da banda 4 numa composição RGB modifica a estrutura visual dos dados e salienta várias feições geológicas em função do contraste fornecido pela maior ou menor presença da cobertura vegetal verde. Tal correlação está evidenciada nas máscaras definidas pelo processo de classificação (Figuras 5.2 e 5.3). Todavia, o desenvolvimento da vegetação leva a uma redução no contraste da imagem, tornando-a espectralmente mais homogênea. Isso é comprovado pelos dados da imagem de 30/05/87, em termos quantitativos, com menor volume de informação (Figura 5.14).

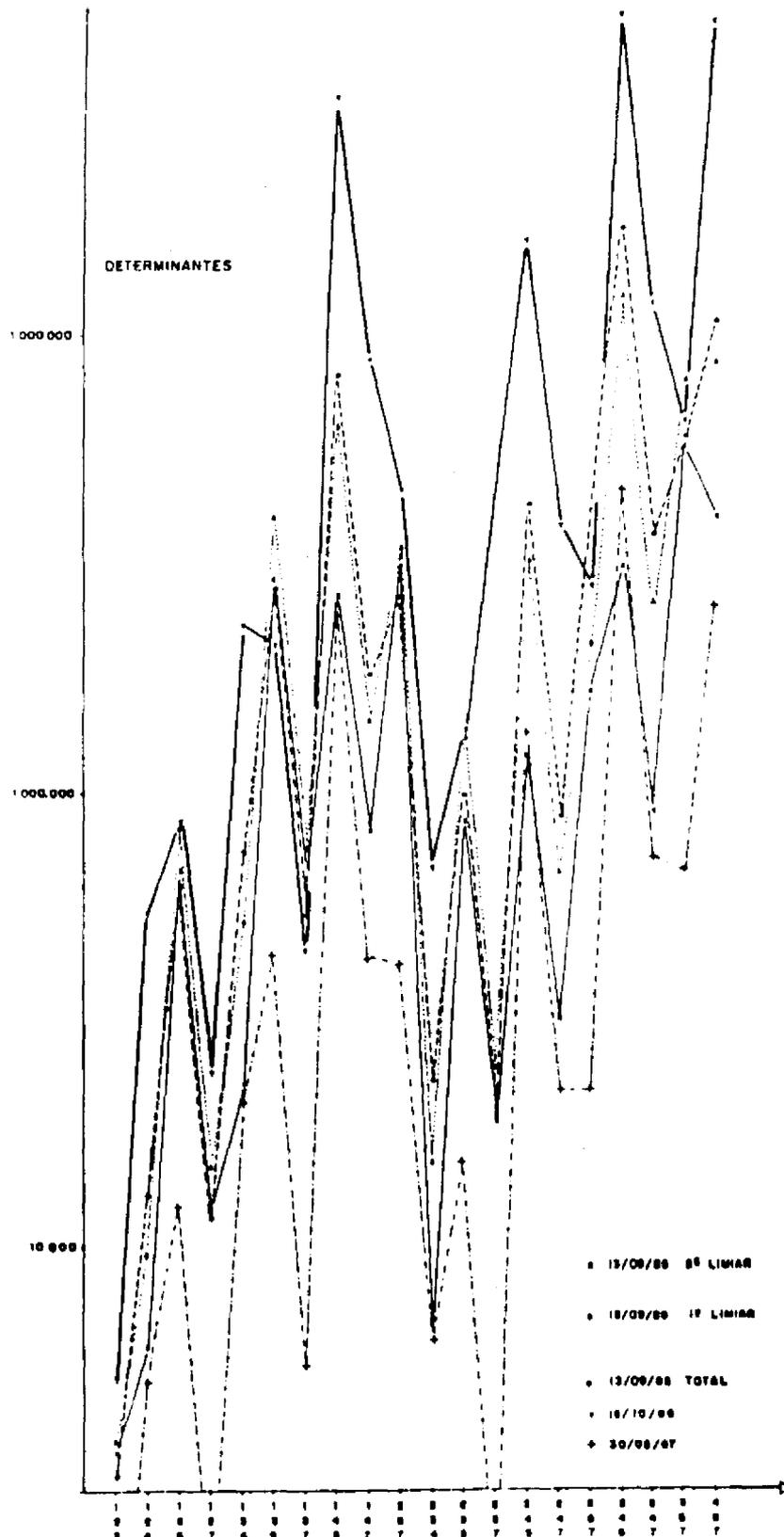


Fig. 5.12 - Determinantes de tripletos de bandas.
(método de Sheffield, 1985).

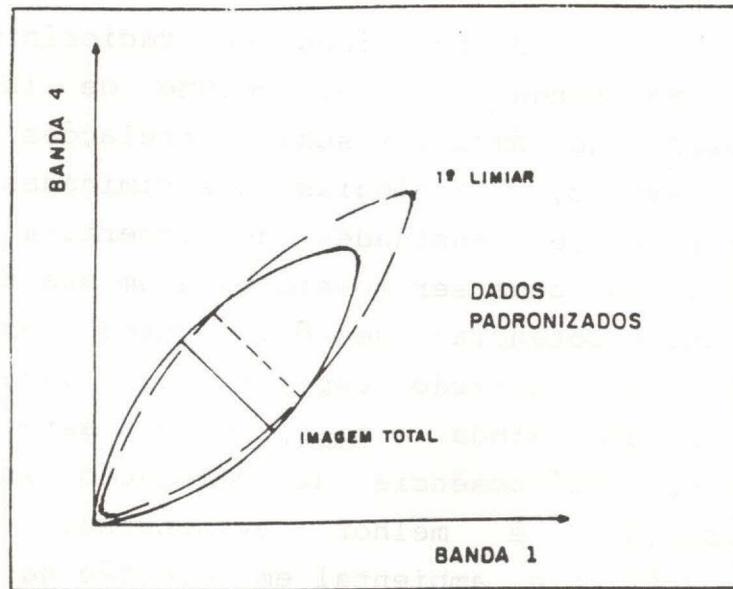


Fig. 5.13 - Elipses de informação para imagens de 13.09.85. Com a subtração da vegetação há um aumento da 1ª componente principal e redução da 2ª.



Fig. 5.14 - Composição 4R3G5B de 30.05.87 com ampliação de contraste.

Áreas de vegetação espectralmente mais homogêneas (v).

Nessa linha de raciocínio, a imagem de 15/10/85, tendo o maior volume de informação, embora apresente no âmbito visual correlações com a Geologia - por exemplo, litologias discriminadas por diferentes proporções de densidades de cobertura vegetal (Figura 5.15), não pode ser considerada em sua totalidade como de exclusivo potencial geológico, tendo em vista que nem sempre a variação espectral da vegetação terá este significado. Ainda o tipo de contraste, fornecido pela presença ou ausência de vegetação (segundo nível de informação), é melhor evidenciado para a região fisiográfica e ambiental em questão na imagem da época seca, a qual facilita inclusive uma abordagem espectral de solos e rochas devido à maior exposição dessas áreas. Portanto, nesse contexto, esta última, ainda que não apresente o maior volume de informação global, é escolhida por esta abordagem qualitativa como a de maior potencial de discriminação litológica. (Figura 5.16).

Uma restrição a essa análise vem da comparação realizada somente entre composições RGB convencionais. Como a imagem de 15/10/85 possui o maior volume de informação, seu potencial para a abordagem geobotânica deverá ainda ser verificado através do uso de técnicas de processamento de imagens que permitem realçar sutis diferenças espectrais.

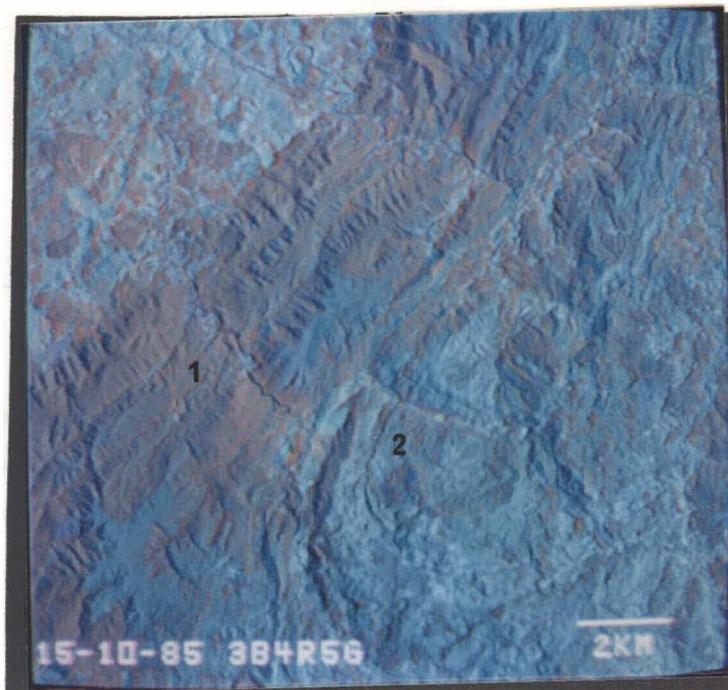


Fig. 5.15 - Composição 4R5G3B de 15.10.85 com ampliação de contraste.

Maior expressão de áreas cobertas por vegetação leva a uma perda no segundo nível de informação. (1) unidades D e C, maior densidade de cobertura vegetal; (2) unidade F, menor densidade de cobertura vegetal.

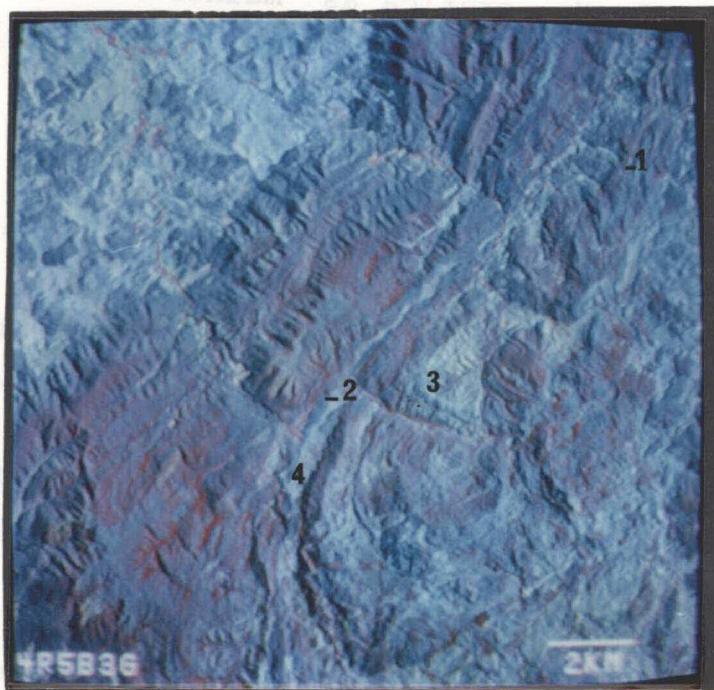


Fig. 5.16 - Composição colorida 4R3G5B de 13.09.85 com ampliação de contraste.

(1) Alinhamentos de vegetação auxiliam a demarcação de contatos litológicos e estruturas, (2) quartzitos puros, (3) solos caulínicos, (4) unidade G.

5.3.3 - DESCRIÇÃO E AVALIAÇÃO VISUAIS DAS COMPOSIÇÕES SELECIONADAS DA ÉPOCA SECA

Numa análise visual, dificilmente o intérprete alcança a totalidade da informação contida na imagem digital. Por isto, as melhores composições não deveriam ter tão somente o maior conteúdo de informação, mas também a melhor mostra da informação. Para tanto, as composições selecionadas para a passagem de 13/09/85 foram avaliadas ao nível visual.

Para cada composição colorida existe a possibilidade de seis permutações em relação aos canhões de cores RGB. Na prática as melhores composições foram conseguidas associando a banda 4 na cor vermelha e a banda 5 no azul. Embora em algumas composições, por exemplo 4R5G3B, esta última disposição tivesse dado a impressão de cores mais saturadas, via de regra, a disposição da banda com maior variância no azul permitiu a maior sensação de relevo. Esses resultados corroboram com a fundamentação teórica descrita na Seção 3.3, que indica uma composição colorida, tendo a banda com maior variância no azul e menores coeficientes de correlação no vermelho. Um resultado de compromisso intermediário foi conseguido também dispondo a banda com maior variância no canal vermelho.

A descrição, aqui adotada, baseia-se mais no realce obtido em cada composição para os níveis de informação percorridos por Feng (1985), do que propriamente no seu potencial de discriminação litológica na área de estudo. Basicamente, as composições 4R3G5B, 4R5G1B, 4R7G5B são visualmente redundantes. A vegetação, representada pelo matiz vermelho, contrasta bem com as

áreas de exposição de solos e rochas (matizes ciano a azul esverdeado) e auxilia na demarcação de contatos litológicos (Figuras 5.16 e 5.17). Dessas três composições, a de melhor mostra de cores é a 4R3G5B. Embora exibindo apenas uma gama restrita de cores, ela demarca bem algumas litologias : unidade E e outros quartzitos, representados pela cor azul, e solos caulínicos e unidade G, representados pela cor ciano claro (Figura 5.16). A composição 4R3G1B, que apresenta cores mais saturadas, marca igualmente essas litologias, porém com perda na impressão de relevo e aparecimento de ruídos aleatórios, devido à forte ampliação de contraste aplicada na banda 1. Por outro lado, a composição 4R7G5B exibe uma forte impressão de relevo. Contudo, suas áreas de exposição de solos e rochas aparecem quase exclusivamente em uma única cor, devido à forte correlação entre as bandas 5 e 7 (Figura 5.17).

Em relação às composições selecionadas para discriminação de solos e rochas (5R7G3B e 5R7G1B), observa-se que elas, embora diferentes das três primeiras, são entre si redundantes. A substituição da banda 3 pela 1 novamente traz uma perda na sensação de relevo, função de uma maior saturação de cores. Enquanto essas duas composições realçam melhor o terceiro nível de informação, há uma atenuação na mostra da informação de segundo nível, devido ao menor contraste da cor relacionada à vegetação (Figura 5.18).

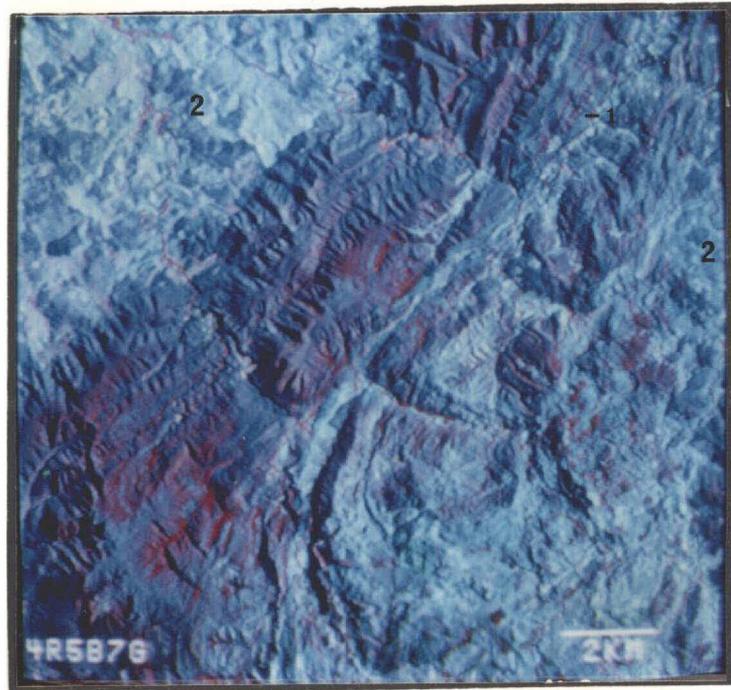


Fig. 5.17 - Composição colorida 4R7G5B de 13.09.85 com ampliação de contraste.

Observa-se uma redundância de informação em relação à Figura 5.16. (1) contatos demarcados por alinhamentos de vegetação verde, (2) áreas de exposição de solos e rochas aparecem quase que exclusivamente em ciano.



Fig. 5.18 - Composição 5R7G3B, com pré-equalização das médias e ampliação linear nos componente I e S.
Quartzitos puros (1) e materiais com absorção na banda TM3 (2) aparecem em amarelo intenso.

Dessa análise, seleciona-se a composição 4R3G5B como a solução de melhor compromisso, visto ser esta a que exhibe a mostra mais completa dos níveis de informação. Uma limitação à utilização dessas composições advém da extração da informação geológica, baseada mais na visualização dos primeiro e segundo níveis do que propriamente na de terceiro nível de informação, posto que as diferenças espectrais entre solos e rochas, embora presentes, aparecem muito sutis para ser prontamente reconhecidas nesses produtos.

5.4 - REALCE DOS ATRIBUTOS ESPACIAIS

Esse método consiste na utilização de operadores digitais que simulam uma função de espalhamento pontual de um filtro linear, cuja a transformação pode ser expressa pela equação abaixo:

$$D'(ij) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N W(m,n) \cdot D(i+m, j+n) \quad (5.1)$$

onde: D_{ij} e D'_{ij} são imagens de entrada e saída, respectivamente, e W é o peso de uma máscara de convolução com $2M + 1$ colunas e $2N + 1$ linhas.

Portanto, a utilização de filtros espaciais requer a definição das dimensões e dos pesos dos operadores digitais. O "software" SITIM 2.2 permite a especificação de três dimensões: 3x3, 5x5 e 7x7. Um filtro realça uma determinada frequência espacial, equivalente a $\lambda = (n-1)/2$, onde n é a dimensão do operador. Para a imagem de estudo, a dimensão mais apropriada foi a 7x7, o que significa que nela as principais feições geológicas têm um

comprimento de onda em torno de 3 "pixels", ou seja, com um padrão de repetição de 90 m no terreno. Filtros 3x3 realçaram frequências espaciais menores do que as feições topográficas, causando degradação visual da imagem. Operadores só com pesos negativos em torno do ponto central enfatizaram o ruído, e os elementos estruturantes em cruz foram preferidos aos quadrados. Quanto à especificação do peso central, maiores valores suavizaram os filtros, e pesos positivos em torno do ponto central eliminaram o ruído mais fino. Já, pesos negativos decrescentes em direção às bordas do operador deram bons resultados. Filtros direcionais, quando aplicados sucessivamente, tenderam a degradar a imagem. Dos operadores testados, foram selecionados dois, dos quais foi utilizado o número 2 (Figura 5.19).

1)	2)
-3	-3
-2	-2
1 1 1	1
$\frac{1}{23} \times$ -3 -2 1 55 1 -2 -3	$\frac{1}{14} \times$ -3 -2 1 30 1 -2 -3
1 1 1	1
-2 -2 -2	-2
-3 -3 -3	-3

Fig. 5.19 - Dois filtros lineares passa-altos.

A imagem utilizada para o realce e extração dos atributos espaciais foi a da passagem de 13/09/85. Essa escolha baseia-se no seu maior azimute solar (65°). Este facilita o realce e a interpretação das principais feições geológicas da área, que são desenvolvidas segundo a orientação nordeste. Por outro lado o menor ângulo de elevação solar da imagem de 30/05/87 seria mais favorável para o realce de textura, contudo o relevo movimentado da área de estudo faz com que a diferença entre os ângulos de elevação dessas duas imagens não se torne tão crucial.

A extração dos atributos espaciais foi realizada preferencialmente na banda 4 filtrada. Devido à sua maior homogeneidade tonal, ela favoreceu a observação dos elementos lineares de textura, equivalentes à foliação, falhas e fraturas (Figura 5.20). A utilização da primeira componente principal filtrada e obtida das bandas 3, 4, 5 e 7 complementou o processo de fotointerpretação, adicionando mais finos detalhes, como contatos entre camadas e contrastes tonais entre materiais com diferentes albedos, os quais não foram exibidos pela banda 4 (Figura 5.21).



Fig. 5.20 - Banda 4 filtrada.

Maior homogeneidade tonal entre áreas de solos, rochas e vegetação. (1) faixa do Grupo Serra de Inhaúma, disposta em arco. (2) alinhamento estrutural.



Fig. 5.21 - Primeira componente principal filtrada.

Detalhes mais finos são visíveis: (1) quartzitos dobrados.

5.5 - REALCE DOS ATRIBUTOS ESPECTRAIS

5.5.1 - RAZÃO DE BANDAS

Através da técnica Razão de Bandas, pode-se gerar uma imagem aproximada do gradiente da curva de reflectância espectral entre as bandas consideradas, conseqüentemente facilitando a discriminação de materiais geológicos com base no reconhecimento diagnóstico de bandas de absorção. O método consiste na divisão de níveis de cinza de "pixels" de um canal pelos valores dos mesmos "pixels" de outro canal. Como essa operação resulta em números reais e contínuos, para a discretização desses valores, multiplicam-se os quocientes por um fator de ganho, que deve ser alto para maximizar a variância, e adiciona-se um deslocamento ou "offset", de modo a transportar a média o mais próximo possível do nível 127, impedindo a saturação.

5.5.1.1 - SELEÇÃO DE RAZÕES DE BANDAS

Uma restrição à aplicação do método Razão de Bandas é o elevado número de imagens e combinações possíveis de serem geradas. Para o sensor TM, com exceção da banda termal, isso corresponde a 15 razões que podem ser combinadas em 455 tripletos.

Com o objetivo de comprovar uma metodologia adequada à resolução da restrição acima, parâmetros estatísticos das razões de bandas foram estimados para os dados das imagens de 13/09/85 - total e de 13/09/85 - segundo limiar, segundo o método de George e Dusseault (1986) e utilizados no cálculo de determinantes de tripletos de razões (método de Sheffield, 1985). Ver

Tabelas 5.4 e 5.5, das quais se excluem os dados das razões 7/1, 7/5 e 2/1 que apresentaram as menores variâncias estimadas.

Pela comparação de ambos os resultados, verifica-se que a exclusão da classe vegetação produziu um decréscimo nas variâncias estimadas de todas as razões. Efeito que se deve às menores diferenças entre os gradientes de reflectância de solos e rochas. Em relação aos dois conjuntos de imagens, observa-se que as maiores variâncias estimadas correspondem aos produtos 5/2, 5/1 e 5/3, enquanto as menores variâncias estimadas para os dados com exclusão da classe vegetação pertencem, em geral, aos produtos gerados com bandas mais próximas no espectro. Observa-se, ainda, em ambos os dados, uma redução nos coeficientes de correlação das razões (valor absoluto) em relação às bandas originais.

A fim de reduzir o número de cálculos de determinantes, foram eliminadas as razões 2/1, 3/2, 4/3 e 7/5 (imagem - segundo limiar), que apresentaram as menores variâncias (Tabela 5.5) e a razão 4/1, suposta ser espectralmente reduntante em relação a 4/2. O produto 7/5, embora de utilização geológica na identificação de áreas com alteração hidrotermal, mostra na prática uma qualidade visual degradada. Como a variância estimada para esse produto foi a menor obtida, ela pode ser usada para explicar essa baixa qualidade causada pela utilização de ganhos mais elevados, necessários à obtenção de um mínimo contraste visual. Em suma, a ausência de informação acarreta a ampliação do ruído presente na imagem. Com a eliminação da razão 7/5, foi mantida em sua substituição o produto 7/4.

Como resultado, verifica-se que os tripletos de razões de bandas estimados com os dados da imagem total, apresentaram maiores determinantes do que os com a exclusão da vegetação (Tabela 5.6). Em ambos os dados, os primeiros tripletos classificados compreenderam duas ou mais razões obtidas com a banda 5, o que implica que a frequência dessa banda nas razões aumenta sobremaneira o valor do determinante.

Com base nos resultados teóricos que apontaram as razões que compõem os primeiros tripletos classificados e em informação sobre o comportamento espectral de alvos geológicos (razões 5/2, 5/1 e 3/1 para a detecção de íon férrico/ferroso e 4/2 e 7/4 para informação geobotânica), foram selecionadas oito razões para implementação na etapa de processamento digital: 5/2, 5/3, 5/1, 5/4, 7/2, 7/4, 4/2 e 3/1.

Tratando-se de uma comparação numérica entre volumes de informação de imagens razões, é fundamental que se estabeleça um valor fixo de ganho nesta transformação digital ($NC_{a/b} = G \cdot NC_a / NC_b - \text{offset}$). A utilização de um ganho mais elevado resultará numa maior variância para a imagem razão. Nessa situação, uma maior variância nem sempre significará um maior conteúdo de informação, mas tão somente uma maior dispersão do histograma de níveis de cinza. Como se deseja um maior ganho, define-se um valor fixo equivalente a $G = 42,6 / D.P.\text{max.}$, onde $42,6 = 128/3$ e $D.P.\text{max.}$ é o maior desvio padrão estimado ($D.P.\text{max} = 1,194$ da razão 5/2, imagem total). Considerando uma distribuição normal, a razão 5/2, obtida com este ganho ($G=35$) deverá ter 99,73% de seus resultados dentro da faixa dinâmica do

equipamento ($3D.P.max.= 128 \Delta NC$). No cálculo do "offset" ou deslocamento, usam-se valores variáveis equivalentes a "offset" = $127 - G.(x_a/x_b)$, onde x_a e x_b são as médias das bandas utilizadas. O resultado esperado é uma aproximação da média da razão ao N.C. 127, valor mediano do equipamento.

Os resultados estatísticos das razões implementadas, em comparação com os valores estimados pelo método de George e Dusseault (1986), são apresentados na Tabela 5.7. As médias obtidas situam-se em N.C. de 109 a 115, cerca de 15 N.C. abaixo do esperado. Ambos os dados de variâncias mostram, com exceção da 7/4, concordâncias de 70 a 98%, percentagens mais elevadas para razões com maiores variâncias. A ordem de grandeza das variâncias, excluindo-se a 7/4, é a mesma entre os dois tipos de dados. Covariâncias equivalentes, via de regra, aproximam-se, com exceção das 5/2-7/4, 4/2-5/2, 3/1-5/2, 3/1-5/3. Quanto aos volumes de elipsóides, observa-se que os determinantes de tripletos de razões implementadas apresentaram-se sistematicamente mais elevados do que os calculados com os dados estimados (Tabela 5.8). Contudo, houve uma relativa concordância entre esses valores, principalmente em relação à ordem dos três primeiros resultados (5/2,5/1,4/2; 5/2,5/3,5/1 e 5/2,5/3,5/4, imagem total) e entre os conjuntos dos 12 primeiros classificados, excluindo-se os tripletos compostos pela razão 7/4 (Figura 5.22).

TABELA 5.6

VALORES DE DETERMINANTES OBTIDOS DE PARÂMETROS ESTIMADOS PARA IMAGEM

DE 13.09.85 - SEGUNDO LIMAR

Imagem 13/09/85 - 2º Limiar		Ganno = 10							
5D1,5D2,5D3	59526	5D1,7D1,5D4	2887	5D2,7D2,7D3	1424	4D2,7D2,5D4	655	7D2,7D3,5D4	206
5D1,5D2,5D4	36838	3D1,5D1,5D4	2867	3D1,4D2,5D3	1414	7D1,5D3,7D3	635	7D1,7D2,7D4	205
5D1,5D2,7D2	28620	5D2,7D3,5D4	2831	3D1,5D1,7D1	1388	7D1,7D2,5D4	629	3D1,7D1,7D2	192
5D1,5D3,7D2	19669	3D1,5D1,4D2	2812	5D1,7D1,7D3	1264	3D1,7D2,5D4	628	3D1,4D2,7D4	192
5D1,5D3,5D4	18416	7D2,5D3,5D4	2810	3D1,5D1,7D4	1192	3D1,7D1,4D2	628	3D1,7D3,5D4	177
5D1,4D2,5D3	18063	5D1,7D1,4D2	2745	7D1,4D2,7D3	1059	3D1,5D3,7D4	599	7D1,4D2,7D4	177
5D1,7D1,5D2	17751	5D1,7D1,7D2	2515	7D1,5D3,7D4	1050	5D3,7D3,5D4	594	7D1,7D2,7D3	175
5D1,5D2,7D4	15289	7D1,5D2,7D4	2498	3D1,4D2,7D2	1000	4D2,5D3,7D3	581	7D2,5D4,7D4	140
5D1,5D2,7D3	15102	5D1,7D3,5D4	2470	5D2,5D4,7D4	992	7D1,4D2,7D3	572	7D1,5D4,7D4	127
7D1,5D2,5D3	14918	5D1,4D2,5D2	2437	7D1,4D2,7D2	957	7D2,5D3,7D3	444	4D2,5D4,7D4	126
5D2,5D3,5D4	13183	3D1,5D2,7D4	2263	5D1,5D4,7D4	894	5D1,7D1,7D4	408	3D1,7D1,7D4	112
5D2,7D2,5D3	10045	7D1,7D2,5D3	2220	5D1,7D3,7D4	867	5D3,5D4,7D4	366	7D1,7D3,7D4	102
3D1,5D1,5D2	9268	3D1,5D2,7D3	1811	5D2,7D3,7D4	836	4D2,7D3,5D4	360	3D1,7D2,7D3	97
5D1,7D1,5D3	8914	5D1,7D2,7D4	1749	7D2,5D3,7D4	767	3D1,7D1,5D4	351	3D1,5D4,7D4	88
4D2,5D2,5D3	8720	4D2,5D2,7D3	1748	5D2,7D2,7D4	731	3D1,5D3,7D3	350	5D3,7D3,7D4	84
7D1,5D2,5D4	8331	4D2,5D3,5D4	1675	3D1,4D2,5D4	699	4D2,7D2,7D3	328	7D2,7D3,7D4	70
5D1,4D2,7D2	8162	5D1,7D2,7D3	1584	3D1,7D1,5D3	698	7D1,7D3,5D4	320	4D2,7D3,7D4	63
3D1,5D1,5D3	8123	5D1,4D2,7D4	1567	3D1,5D1,7D3	698	3D1,4D2,7D3	316	3D1,7D3,7D4	56
5D1,5D3,7D4	7657	3D1,7D2,5D3	1539	4D2,5D3,7D4	687	4D2,7D2,7D4	313	7D3,5D4,7D4	52
5D1,7D2,5D4	5862	3D1,5D3,5D4	1441	4D2,5D2,7D4	655	3D1,7D2,7D4	214	3D1,7D1,7D3	9,01

Variâncias estimadas multiplicadas por 100, o que equivale a um ganho de 10 aplicado à razão.

TABELA 5.8

CÁLCULO DE DETERMINANTES PARA IMAGENS DE 13.09.85 DADOS TOTAIS

GANHO = 35

ESTIMADO		REAL	ESTIMADO		REAL	ESTIMADO		REAL
5d2, 5d1, 4d2	364.675.135	650.407.101	5d3, 7d2, 4d2	47.197.470	111.130.383	5d1, 5d4, 3d1	28.061.125	26.576.411
5d2, 5d3, 5d1	325.930.010	567.301.335	5d3, 5d4, 4d2	25.535.348	107.175.519	5d2, 7d4, 3d1	10.650.911	25.492.821
5d2, 5d1, 5d4	302.788.084	429.424.631	5d1, 5d4, 7d2	44.195.582	99.224.263	5d3, 4d2, 3d1	15.213.486	23.229.202
5d3, 5d1, 4d2	204.314.870	377.498.035	5d2, 5d4, 7d2	38.752.478	97.870.674	5d3, 5d4, 3d1	14.908.334	20.266.442
5d2, 5d3, 4d2	181.025.046	371.448.718	5d1, 5d4, 7d4	4.577.281	96.308.682	5d1, 7d4, 3d1	6.864.930	19.128.973
5d2, 5d1, 7d4	81.451.712	330.067.534	5d3, 7d4, 4d2	6.674.742	94.469.208	5d4, 7d2, 7d4	713.247	18.811.695
5d3, 5d1, 7d2	212.841.747	320.120.978	5d3, 5d4, 7d2	31.309.340	80.051.872	5d2, 7d2, 3d1	14.024.128	17.036.417
5d2, 5d3, 7d2	150.367.969	270.556.204	5d1, 7d2, 7d4	9.149.048	75.161.995	5d1, 7d2, 3d1	14.599.506	16.824.853
5d3, 5d1, 7d4	52.111.154	226.358.734	5d3, 5d4, 7d4	3.047.844	74.576.548	5d3, 7d4, 3d1	3.940.225	14.140.954
5d2, 5d1, 7d2	105.003.571	221.047.938	5d2, 7d2, 7d4	5.038.686	72.627.218	5d3, 7d2, 3d1	7.750.128	13.287.993
5d2, 5d3, 7d4	39.761.685	213.239.659	5d2, 5d1, 3d1	42.963.944	59.045.653	7d2, 4d2, 3d1	8.968.897	10.802.392
5d3, 5d1, 7d2	76.889.136	203.809.368	5d3, 7d2, 7d4	5.106.702	58.522.589	5d4, 4d2, 3d1	6.768.494	10.607.667
5d2, 7d4, 4d2	6.625.109	179.596.506	5d2, 4d2, 3d1	47.936.452	50.009.298	7d4, 4d2, 3d1	1.268.403	8.309.511
5d1, 7d2, 4d2	84.615.367	176.452.757	5d2, 5d3, 3d1	22.844.127	41.413.355	5d4, 7d2, 3d1	4.020.287	5.547.584
5d1, 5d4, 4d2	77.580.324	176.070.787	5d4, 7d2, 4d2	6.674.742	41.005.295	5d4, 7d4, 3d1	351.109	4.783.422
5d2, 5d4, 4d2	97.490.579	160.295.855	5d1, 4d2, 3d1	28.632.740	37.330.110	7d2, 7d4, 3d1	970.604	4.242.059
5d1, 7d4, 4d2	11.970.786	152.678.815	7d2, 7d4, 4d2	1.529.488	36.102.907			
5d2, 7d2, 4d2	46.686.432	152.655.186	5d3, 5d1, 3d1	462.231	35.410.956			
5d2, 5d3, 7d2	54.866.714	147.947.831	5d4, 7d4, 4d2	933.839	35.319.201			
5d2, 5d4, 7d4	5.487.223	115.741.928	5d2, 5d4, 3d1	39.802.127	33.185.549			

5.5.1.2 - DESCRIÇÃO DAS IMAGENS RAZÕES

As principais diferenças entre as imagens razões e as bandas originais são a redução dos níveis de quantização e o decréscimo das correlações entre canais. Isso facilita o realce da informação espectral, segundo e terceiro níveis de informação, tornados proporcionalmente mais relevantes.

Para a comparação qualitativa dos resultados classificados pelo método do determinante (Sheffield, 1985), foram definidos quatro critérios de avaliação visual (Tabela 5.9). O critério de eliminação de relevo refere-se à impressão do relevo remanescente na imagem razão. O ruído compreende tanto o não-correlacionado, quanto a presença de faixas horizontais relacionadas à calibração dos detetores. O contraste descreve a variação tonal observada na imagem, e a correlação geológica refere-se ao potencial de discriminação de litologias na área em estudo. Pela Tabela 5.9, observa-se que as razões de bandas com maiores variâncias, embora apresentassem maior contraste tonal, foram inferiores, via de regra, no tocante à presença de relevo residual, ruído e correlação geológica.

Com maior variância, a razão 5/2 apresenta a pior qualidade visual, não sendo eficaz na discriminação de litologias na área de estudo. O produto 5/1 discrimina materiais geológicos com bandas de absorção férrica/ferrosa e separa diferentes tipos de solos (Figura 5.23). Seus problemas de ruído e relevo residual podem ser atenuados, empregando-se algoritmo de eliminação de ruídos. A razão 5/4 é redundante à 4/2 que melhor exhibe a correlação entre a geologia e a densidade de cobertura

vegetal verde (Figura 5.24). A razão 5/3 compreende diferentes gradientes de reflectância entre as unidades G com B e F e discrimina áreas de solos caulínicos da unidade F e os diferentes tipos de solos do Embasamento (Figura 5.25). O produto 3/1 exhibe, quase que exclusivamente, os materiais com bandas de absorção fêrrica/ferrosa (latossolos associados a rochas básicas e ultrabásicas), não se observando outro tipo de informação nessa imagem (Figura 5.26). A razão 7/2 é visualmente semelhante à anterior, e por último, a razão 7/4 evidencia a unidade G e define alguns contatos litológicos em função da informação da cobertura vegetal (Figura 5.27).

Da análise visual de imagens razões, observa-se que esses produtos são mais úteis para mostrar temas específicos (por exemplo: crostas e solos ferruginosos), do que informação de caráter genérico. As composições selecionadas pelo método quantitativo não se mostraram de boa qualidade visual. Como os índices desse método são influenciados pela magnitude da variância, os primeiros tripletos classificados foram os compostos por razões com maiores variâncias. Porém, nessa situação, esse parâmetro é enviesado pelo ruído realçado no processo e pela variação tonal, devido ao relevo residual, não sendo, por isto, um claro indicativo de medida de informação. Além disto, a redundância de informação presente nos primeiros tripletos e a não-abrangência de uma gama de gradientes específicos à discriminação litológica prejudicam o potencial de utilização dessas composições.

TABELA 5.9

COMPARAÇÃO VISUAL DE RAZÕES DE BANDAS

Razões de Bandas	5D2	5D1	5D3	5D4	7D4	7D2	4D2	3D1
Eliminação de Relevo	Parcial	Parcial	Parcial	Total	Total	Total	Total	Total
Ruidos e Faixas Horizontais	Fortes	Mé-dio	Mé-dio	Bai-xo	Ausen-te	Bai-xo	Ausen-te	Bai-xo
Contraste	M.Fort	Fort	Fort	Mé-dio	Mé-dio	Mé-dio	Mé-dio	Bai-xo
Relação Geológica	- -	+	+	+ -	++	+	++	+

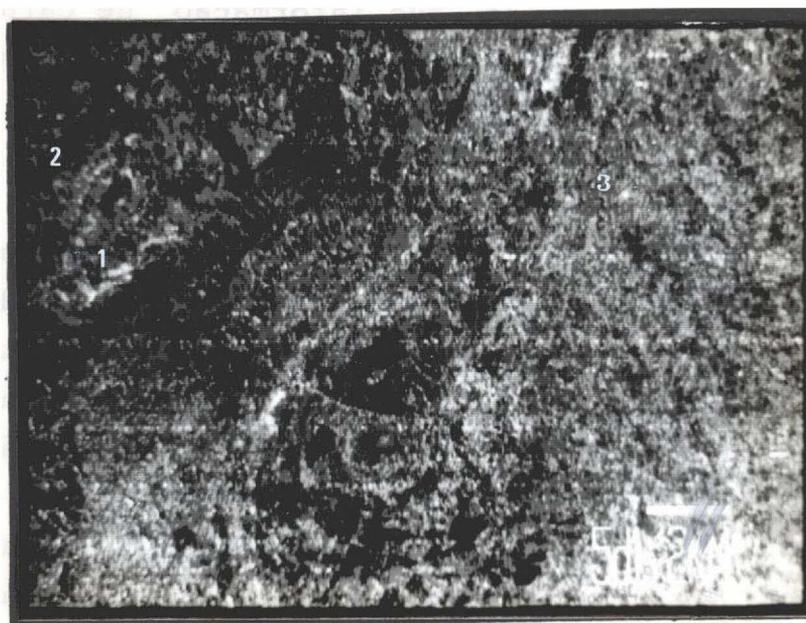


Fig. 5.23 - Razão 5D1, com eliminação de ruído.
 (1) rocha ultrabásica, (2) - solos podzólicos,
 (3) cambissolos.

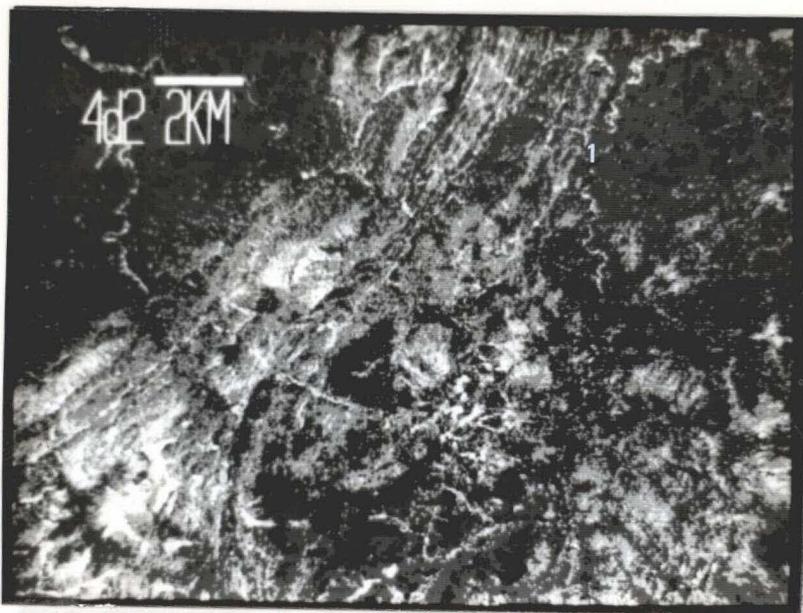


Fig. 5.24 - Razão 4/2.

(1) Contatos definidos pela vegetação.

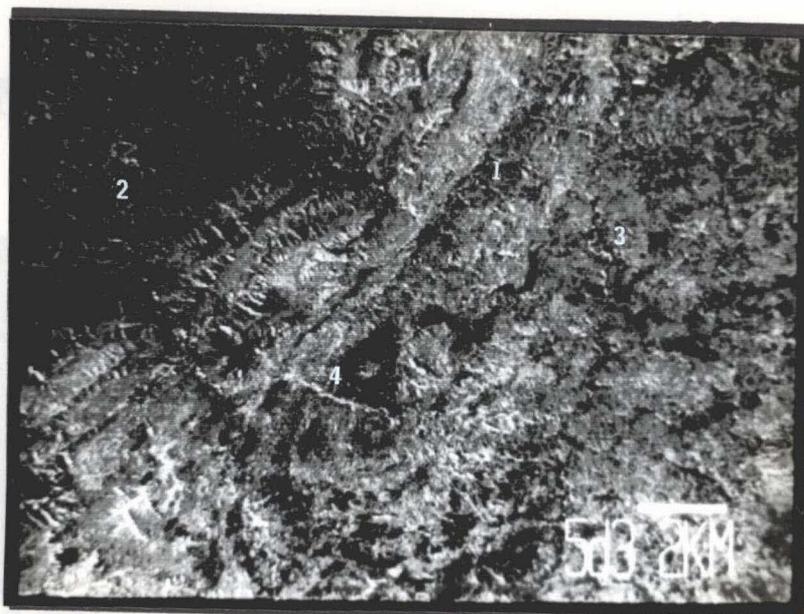


Fig. 5.25 - Razão 5/3.

(1) unidade G, (2) e (3) diferentes tipos de solos do Em basamento, (4) solos caulínicos.

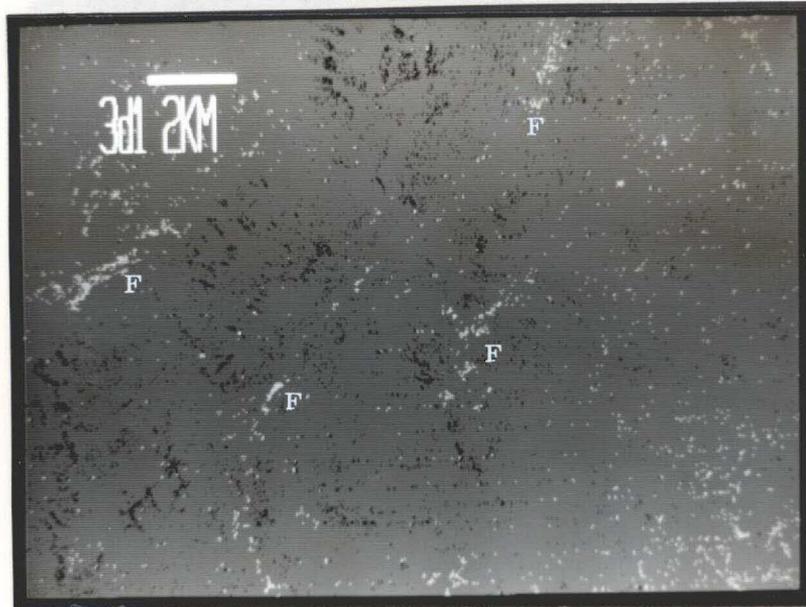


Fig. 5.26 - Razão 3/1.
(F) materiais com absorção fêrrica.

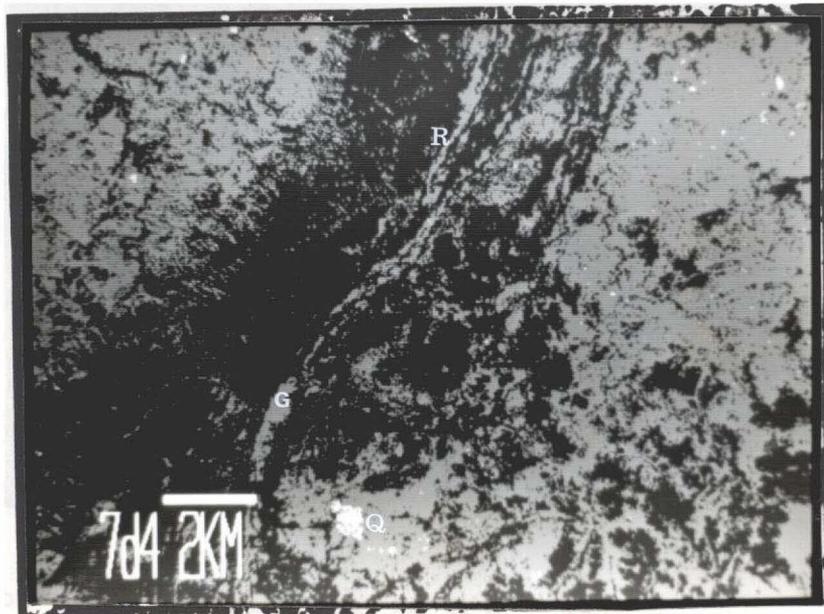


Fig. 5.27 - Razão 7/4.
(R) afloramentos rochosos, (Q) área queimada, (G) unidade G.

Logo, devido à ineficácia do método de seleção de bandas, no tocante às imagens razões, torna-se interessante obter informação, a priori, sobre o comportamento espectral de alvos geológicos para direcionar o emprego dessa técnica. Isso pode ser obtido por levantamentos espectroscópicos de laboratório ou de campo. No entanto, a principal dificuldade da espectroscopia de superfícies geológicas está na integração da resposta espectral de um elemento de resolução no terreno equivalente ao da imagem orbital utilizada. No caso ideal, ambos deverão ter a mesma ordem de grandeza.

Diante da ausência de informação prévia sobre o comportamento espectral das unidades litológicas da área de estudo, foram selecionadas composições de razões com base na avaliação visual das 8 razões implementadas. Desse modo, as razões de bandas com gradientes espectrais específicos à discriminação de materiais geológicos corresponderam aos produtos 3/1, 5/1 e 5/3, aliados às razões 4/2 e 7/4 que auxiliaram a demarcação de litologias em função das informações botânicas, respectivamente, densidade de cobertura vegetal e estresse hídrico. Portanto os melhores resultados foram conseguidos com as composições 5/1-7/4-4/2, 5/1-7/4-3/1, 5/3-3/1-7/4 e 5/1-4/2-3/1 (Figura 5.28).

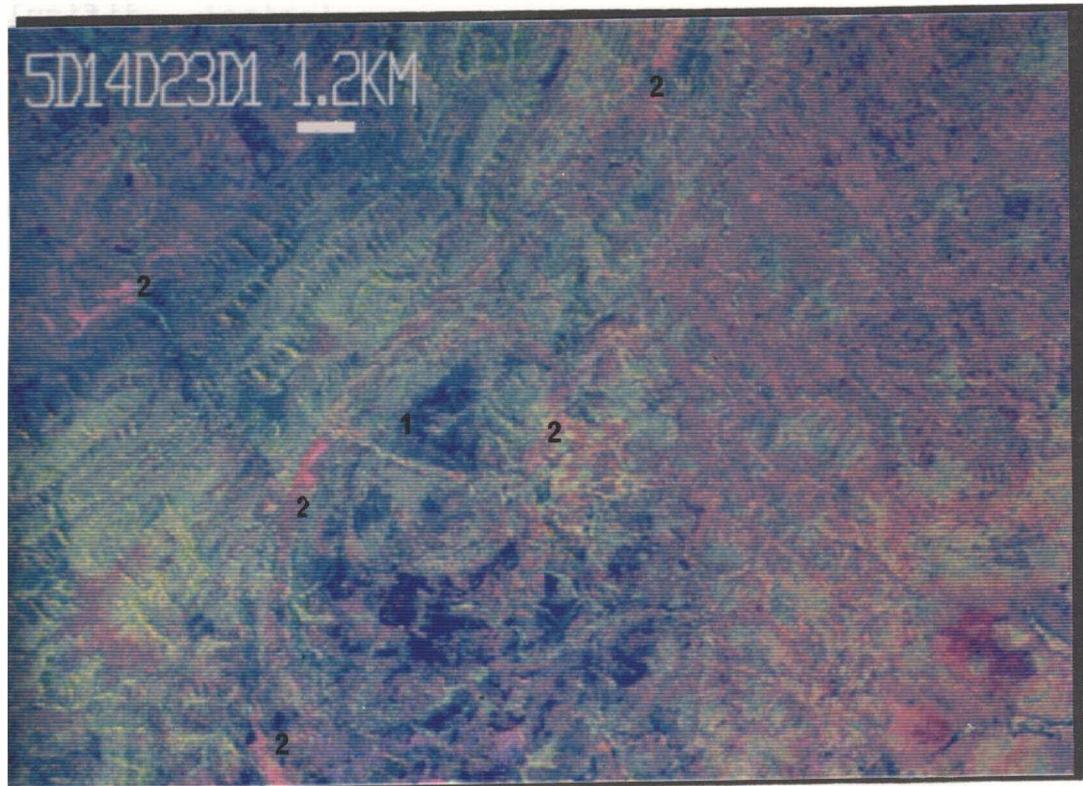


Fig. 5.28 - Composição 5D1R4D2G3D1B.

(1) Solos caulínicos, (2) materiais com absorção fêrrica, vegetação assinalada em verde.

5.5.2 - DESCORRELAÇÃO DE BANDAS

Como demonstrado na seção 5.3, os elipsóides de informação de imagens de solos e rochas são estirados ao longo da linha cinza do cubo RGB (Figura 3.5). Embora razões de bandas realcem diferenças entre gradientes espectrais, o maior afastamento entre classes de solos e rochas encontra-se ao longo do componente intensidade, devido à maior variação em albedo. Porém, esse afastamento é de difícil discriminação em composições coloridas, devido à forte correlação dos dados que resulta em imagens praticamente monocromáticas.

O método de ampliação de contraste por descorrelação consiste na expansão de agrupamentos de dados altamente correlacionados ao longo de seus eixos principais. Após a transformação por componentes principais, amplia-se e equaliza-se a variância de cada componente e novamente reverte-se a função para a original. Como resultado, obtém-se uma representação dos dados utilizando um espaço mais completo de cores, em detrimento de uma certa quantidade de variação de intensidade (Gillespie, 1986), e como há preservação dos matizes da composição original, a cor realçada pode ser ainda usada para interpretar feições de absorção em cada banda (Rothery, 1987).

A fim de posicionar os principais eixos ao longo das direções de maior afastamento das classes de solos e rochas, amostras para as matrizes de rotação foram obtidas do tema complementar à classe de vegetação (Tabela 5.10). Desse modo, foram tratadas as composições 7R5G3B,

4R7G5B e 7R5G1B, as quais foram selecionadas pelo método de Sheffield (1985) como as de maior potencial de discriminação de solos e rochas (imagem 13/09/85 - segundo limiar). O número de desvios padrões (D.P.) utilizados no realce variou de 2 a 3. Esse número corresponde à percentagem dos dados dispostos na faixa dinâmica do equipamento. Três desvios padrões equivalem à mostra de 99% dos dados. Já, um desvio padrão menor implica um maior espalhamento dos histogramas das bandas descorrelacionadas e um conseqüente aumento na saturação das cores.

TABELA 5.10

MATRIZES DE AUTOVETORES E AUTOVALORES

AUTOVETORES											
	3	5	7		1	5	7		4	5	7
3	0,307	0,867	0,392	1	0,175	0,892	0,405	4	0,254	0,883	0,394
5	0,872	-0,421	0,249	5	0,530	-0,432	0,730	5	0,938	-0,126	-0,322
7	-0,381	-0,226	0,886	7	0,830	0,087	-0,551	7	0,235	-0,451	0,861
AUTOVALORES											
1376,16 (96%)				1288,38 (97%)				1460,30 (94%)			
30,11 (2,5%)				19,99 (1,75%)				57,06 (3%)			
14,89 (1,5%)				10,77 (1,25%)				20,88 (1%)			

Das três composições geradas por esse processo, o melhor resultado foi alcançado com o produto 7R5G3B, o qual apresentou a possibilidade de discriminação do maior número de temas geológicos (Figura 5.29). Em seguida, a composição 7R5G1B realçou os materiais geológicos com bandas de absorção no azul (Figura 5.30). Por último, o produto 4R5G7B não apresentou resultados satisfatórios, devido à ausência de contraste espectral entre materiais geológicos no intervalo do infravermelho próximo (760-900 nm) e à interferência dos dados de vegetação no processo de descorrelação do elipsóide formado com a banda 4.

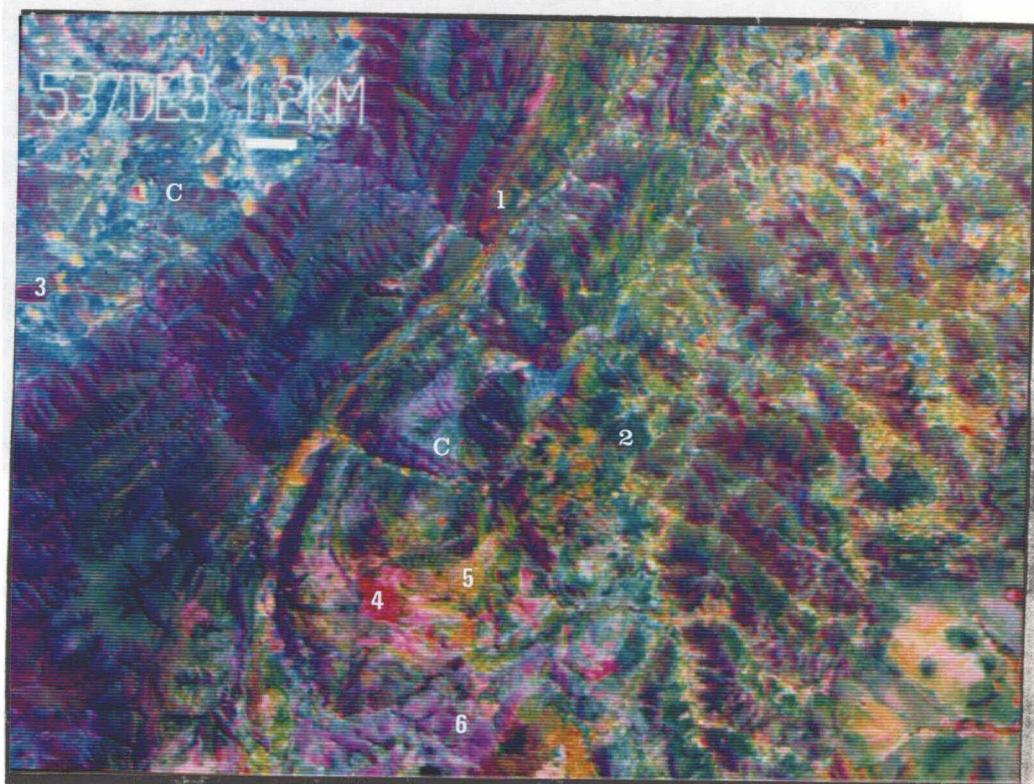


Fig. 5.29 - Composição 7R5G3B descorrelacionada. 3 D.P.
 (C) Ciano-materiais com bandas de absorção no TM7, quartzitos (1); vegetação verde (2); vegetação seca (3); queimada (4); formações superficiais (5 e 6).

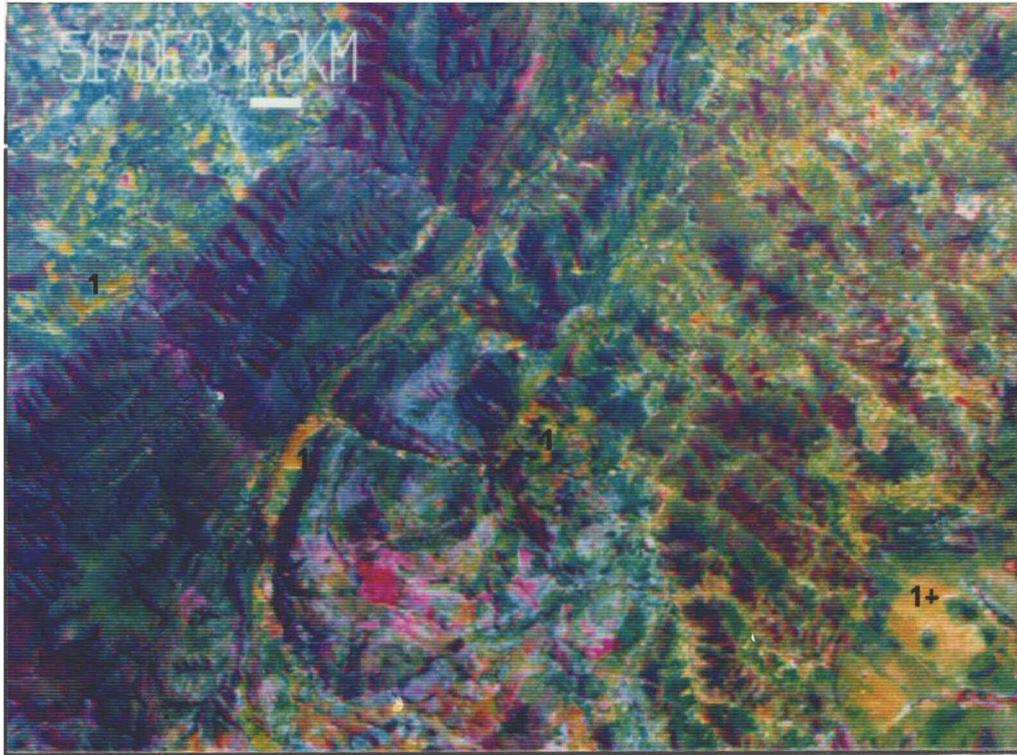


Fig. 5.30 - Composição 7R5G1B, descorrelacionada. 3 D.P.
(1) Materiais com absorção férrica, (1*) latossolos da chapada (amarelo intenso a laranja).

A disposição da banda 7 no canhão vermelho e da banda 5 no verde, em conjunto com a banda 1 ou 3 associada ao azul, facilitou a interpretação das feições de absorção nas respectivas bandas espectrais em função da presença das cores complementares. Assim, o ciano na composição 7R5G3B indica feições de absorção na banda 7. Do mesmo modo, o amarelo na composição 7R5G1B representa feições de absorção diagnósticas na banda 1.

5.6 - INTEGRAÇÃO DOS ATRIBUTOS

5.6.1. - FUSÃO IHS

A visão humana tem a propriedade de ser mais sensível à variação espacial e espectral, nesta ordem dos componentes I (intensidade), H ("hue" ou matiz) e S (saturação), o que torna o método IHS um meio efetivo de fusão de dados, aproveitando o máximo em detalhe espacial (Haydn et alii, 1982). Sendo assim, essa técnica possibilita visualizar em uma única composição colorida o realce de ambos os atributos espectrais e espaciais.

Basicamente, existem dois modos para realizar a fusão IHS. No primeiro, associa-se a banda com realce espacial no canal I e as outras duas com realce espectral nos canais H e S. Após a entrada das bandas, reverte-se a função IHS para representação RGB. O outro método inicia-se com uma composição RGB, passando pela transformação IHS, pela substituição do canal I e novamente pela reversão para representação RGB. O resultado é uma composição que tem cores com matizes e saturações semelhantes às da composição original, e mostra o detalhe espacial enfatizado pela substituição do canal I. Na prática esta última transformação mostrou-se mais

útil à interpretação visual, uma vez que a primeira é desfavorecida devido à dificuldade natural em distinguir variações em S e à inexperiência do fotointérprete para tal tipo de produto.

Nos experimentos testados utilizando o segundo modo de transformação, os resultados mais significativos foram obtidos substituindo-se o canal I, de composições de razões de bandas, selecionadas na etapa anterior, pela primeira componente principal filtrada. Essa componente exibe melhor a variação de albedos (variação que ocorre ao longo da componente intensidade) entre os materiais imageados, tipo de informação não-disponível em imagens razões. Após a transformação IHS, fez-se necessário ampliar levemente o contraste do canal S devido à perda de saturação provocada pela substituição do canal I (Figura 5.31).

5.6.2 - COMPOSIÇÃO HÍBRIDA

Como no processo de descorrelação há uma perda na variação de albedo, foi testada uma composição híbrida que assegurasse também um realce nesse sentido. Para isso, substituiu-se a banda 5 da composição 7R5G3B descorrelacionada - 2 desvios padrões, pela primeira componente principal filtrada, como obtida na Seção 5.4. Visualmente a primeira componente principal é semelhante à banda TM5, como demonstrado pelo peso do autovetor da transformação Componentes Principais (primeira CP-TM5 = 0,84). O resultado obtido foi um incremento nos atributos espaciais e uma diminuição na saturação, todavia mantendo os mesmos matizes da composição descorrelacionada (Figura 5.32).



Fig. 5.31 - Composição 7D4R5D1G4D2B com substituição do canal I pela primeira c.p. filtrada.



Fig. 5.32 - Composição híbrida: 7R5G3B descorrelacionada, 2 D.P., com substituição da banda 5 pela primeira c.p. filtrada.

(1) quartzitos, (2) unidade G, (3) filitos e quartzitos carbonosos, (4) cambissolos, (5) solos podzólicos, (6) formações superficiais.

5.7 - SÍNTESE DA FOTOINTERPRETAÇÃO

A interpretação dos conjuntos de imagens realçadas e selecionadas resultou na discriminação de 9 unidades ou temas espectrais (Figura 5.33). Enquanto algumas composições possibilitaram a separação de um maior número de temas, certas unidades discriminaram-se melhor em composições específicas (Tabela 5.11). De um modo geral, as composições 7R5G3B e 7R5G1B, descorrelacionadas, discriminaram um maior número de temas, sendo seguidas pelas composições 4R3G5B e 5R7G3B IHS. Por outro lado, as razões de bandas permitiram a visualização de temas específicos, como nos exemplos das razões 5/1, 5/3 e 3/1, (Figuras 5.23, 5.25 e 5.26).

Por tratar-se de uma interpretação genérica de feições e materiais superficiais representados nas imagens multiespectrais, muitos desses temas não têm relação com a geologia da área em questão, casos dos temas 3, 8 e 9 (Figura 5.33), respectivamente, áreas de queimadas, de mata seca e máscara de vegetação verde. Muito embora, as áreas de mata seca que apresentam um baixo albedo devido ao efeito de absorção da REM, principalmente na faixa do infravermelho próximo, concentram-se mais sobre as unidades do Grupo Espinhaço Superior, os xistos do Grupo Serra de Inhaúma e os metatexitos do Embasamento. Já, alguns temas necessitam ser analisados de acordo com o contexto em que se situam, esse é o caso dos temas 1, 2 e 4 em relação às áreas do Embasamento. Dentro desse contexto, os temas 1 e 2 representam diferentes tipos de solos podzólicos, ambos exibindo bandas de absorção na banda 7; por sua vez, o tema 4 representa cambissolos com leves bandas de absorção férrica nas regiões do vermelho e do azul (Figura 2.4).

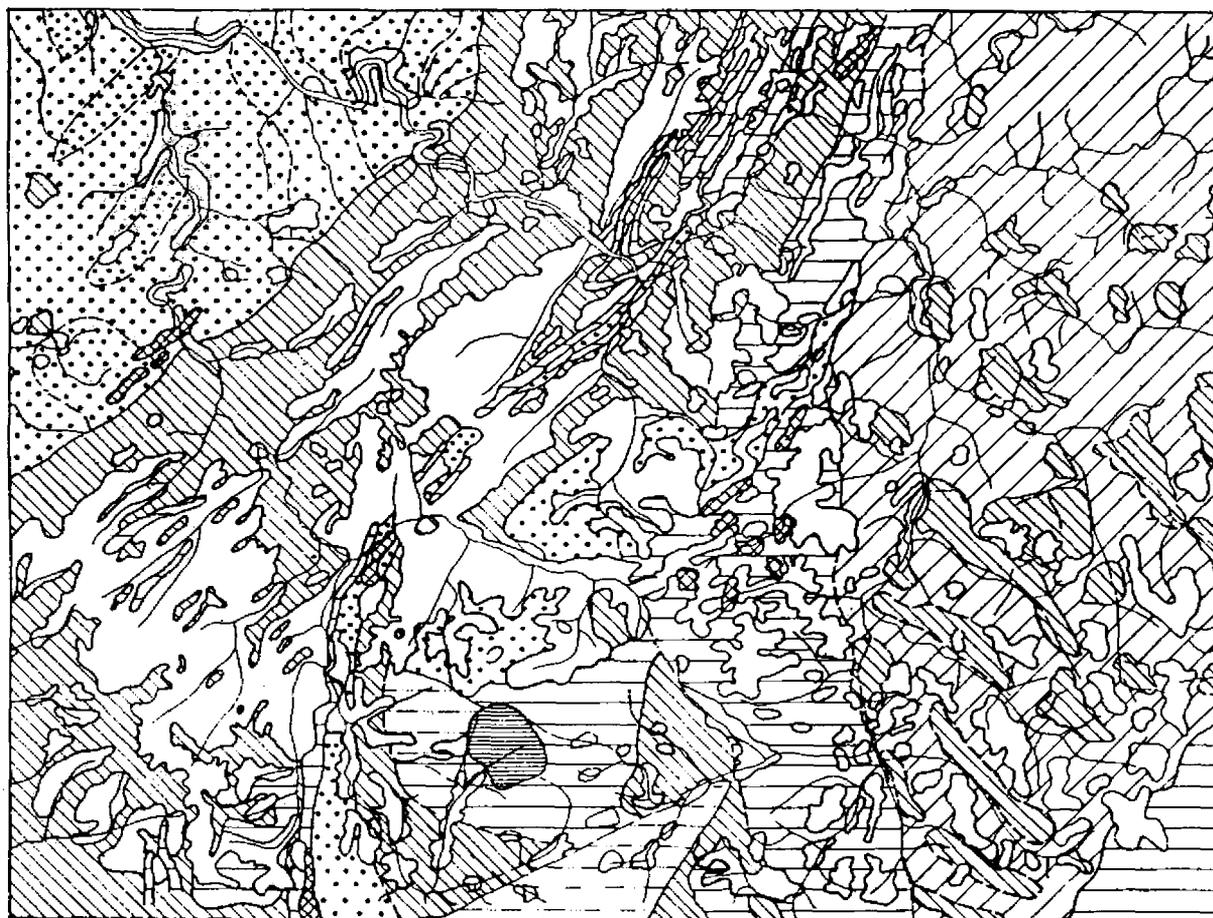


Fig. 5.33 - Mapas de temas espectrais.

(1) solos podzólicos ou caulínicos (tipo A), (2) solos podzólicos ou caulínicos (tipo B), (3) mata seca, (4) cambissolos, (5) latossolos associados a rochas básicas e ultrabásicas, (6) afloramentos de quartzitos e depósitos aluvio-coluvionares oxidados, (7) formações superficiais arenosas, (8) queimadas e (9) vegetação verde.

TABELA 5.11

DISCRIMINAÇÃO DE TEMAS ESPECTRAIS PELAS IMAGENS SELECIONADAS

TEMAS	COMPOSIÇÕES													OBSERVAÇÕES
	573 IHS	4R 3G5B	5/3	7/4	5/1	3/1	4/2	5D14D23D1	357 DESCOR	157DESCOR				
1	+	+ -	++	NOBS	+	NOBS	NOBS	+	+	+	+	+	+	solos caulínicos
2	+ -	+ -	++	NOBS	+	NOBS	NOBS	-	+	+	+	+	+	solos caulínicos
3	-	+ -	NOBS	NOBS	NOBS	NOBS	NOBS	NOBS	+	+	+	+	+	baixo albedo
4	+	-	+	NOBS	+	NOBS	NOBS	+	+	+	+	+	+	cambissolos
5	+ -	NOBS	NOBS	NOBS	++	++	NOBS	+	+	+	+	+	+	baixa p no azul, alto gr 3/1
6	+	+ + .	-	-	-	NOBS	-	-	+	+	+	+	+	quartzitos-baixa p no verm
7	-	-	-	NOBS	NOBS	NOBS	NOBS	-	+	+	+	+	+	alta p nas bandas 7 e 3
8	+	+	-	++	-	NOBS	++	-	+	+	+	+	+	baixa p na banda 4
9	+ -	+ +	-	+-	-	NOBS	++	+	+	+	+	+	+	máscara de vegetação

Outra questão importante refere-se ao contraste espectral entre a reflectância do material e a do fundo de cena (background). Unidades pedológicas ou litológicas distintas, porém com o mesmo contraste espectral, não se discriminam quando inseridas em contigüidade. Essa é a situação do tema 5 (materiais com bandas de absorção férrica), que se salienta bem na região dos solos podzólicos, porém de difícil discriminação no meio de cambissolos (Figura 5.23).

Dos 9 temas espectrais definidos pela fotointerpretação, foram verificados por dados de campo com conotação geológica: Temas 1 e 2 - materiais com bandas de absorção na banda 7 e baixos gradientes 5/1 e 5/3 (Figuras 5.23, 5.25 e 5.29). No contexto da Serra do Espinhaço, esses temas representam as litologias constituídas por quartzitos arcozianos e subarcozianos. A decomposição dessas litologias resulta em um solo areno-argiloso, muito branco, rico em material caulínítico e sericítico, que chega em alguns locais a formar depósitos informalmente denominados "tabatinga" (Figura 5.34). O tema 1 diferencia-se do 2 por apresentar maiores concentrações desse material de alteração, conseqüentemente causando feições de absorção mais intensas na banda 7 e menores gradientes espectrais nos canais 5/1 e 5/3. Tema 5 - materiais com feições de absorção férrica nas bandas 3 e 1 e alto gradiente 3/1. Eles correspondem às ocorrências de latossolos escuros desenvolvidos sobre rochas básicas e ultrabásicas (Figuras 5.26 e 5.30). Tema 6 - representa formações superficiais constituídas por areias oxidadas e extensões de afloramentos de quartzitos, em geral, puros. Sobre estes afloramentos, que sustentam uma escassa vegetação, desenvolve-se uma fina crosta ferruginosa, a qual ocasiona absorção na banda 3 e baixa reflectância na banda 4

(Figura 5.35). Tema 7 - equivale aos depósitos arenosos pouco oxidados e desenvolvidos sobre a Serra do Espinhaço. (número 6 da Figura 5.29).

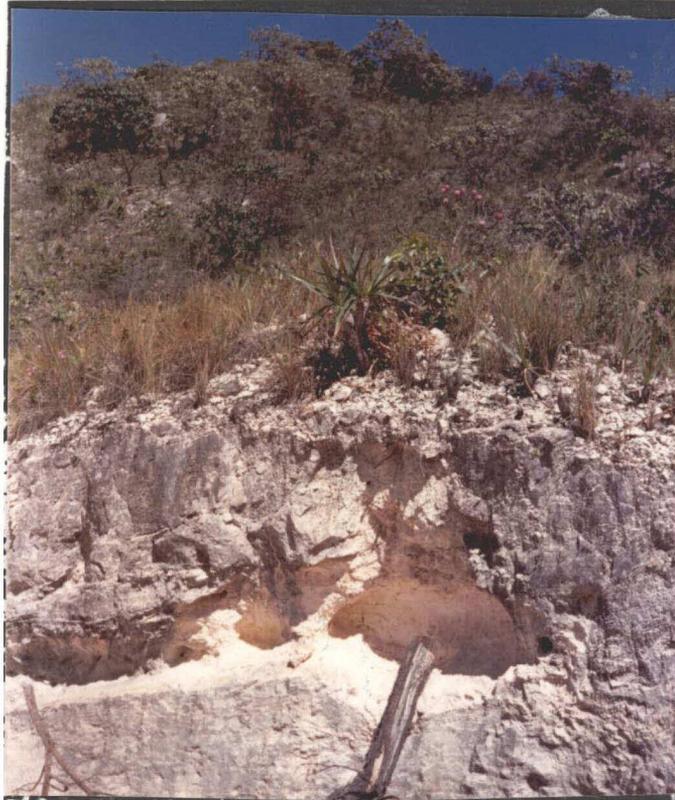


Fig. 5.34 - Ocorrência de solo siltico-argiloso de composição caulínica e sericítica.

Em relação aos atributos espaciais, pela fotointerpretação das imagens filtradas da banda 4 e da 1ª componente principal foram caracterizadas 10 unidades, segundo suas propriedades litológicas inferidas da análise dos elementos de textura de relevo e de drenagem, de acordo com os critérios descritos por Soares e Fiori (1976). Ver Tabela 5.12. E finalmente, a comparação da fotointerpretação de ambos os atributos com o controle de campo resultou na definição de 11 unidades geológicas e respectivas subdivisões litológicas (Figura 5.36).



Fig. 5.35 - Extensões de afloramentos de quartzitos cobertos por fina crosta ferruginosa.

TABELA 5.12
CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES FOTOGEOLÓGICAS SEGUNDO A ANÁLISE
DOS ELEMENTOS DE TEXTURA

UNIDADES FOTOGEOLÓGICAS	PROPRIEDADES							
	RESIST. À EROSÃO	ISOTROPIA	ASSIMETRIA HORIZONTAL	PERMEABILIDADE	GRAU DE FRATURAS	UNIFORMIDADE		
A	-	+		+	-		+	
B	+	-	+	+	+		+	
C	+	-	+	-	+		-	
D	+	-	+	-	+		+	
E	+	-	+	+	+		+	
F	+	-	+	+	+		-	
G	-	-	+	+	+		+	
H	+	-	+	+	+		+	
I	+	-	-	+	+		-	
J	-	-	-	+	+		+	
FORTE + MÉDIO (A) + - BAIXO (A) -								

5.8 - INTERPRETAÇÃO DO ARCABOUÇO LITOESTRUTURAL DA ÁREA DE ESTUDO

Da comparação dos resultados com a informação geológica prévia e dados de campo, confirmou-se uma configuração geológica para a área de estudo, representada por uma sucessão de cavalgamentos de leste para oeste, os quais ocasionaram o empilhamento tectônico de unidades estratigráficas distintas (Figura 5.36). Neste trabalho propõe-se o refinamento da estratigrafia da área de estudo, reconhecendo-se as seguintes unidades descritas da mais antiga para a mais nova:

- Embasamento, o qual foi subdividido nas **unidades J**, representada por granito-gnaisses com porfiroblastos e porfiroclatos grosseiros de feldspato e **unidade I**, constituída por metatexitos de composição intermediária. Corpos de rochas ultrabásicas são encontrados no Embasamento. Esses são compostos por piroxenitos que se apresentam parcialmente preservados.

- O Grupo Serra de Inhaúma (**unidade H**) faz-se representar por uma seqüência predominantemente constituída por mica-xistos, a qual aparece disposta em forma de arco ao redor do rebordo da chapada. A presença de vênulas e veios graníticos atestam uma fase de intrusão magmática, o que indica uma idade pré-Espinhaço para essas rochas. Seus contatos com as unidades do embasamento não são claros, ora evidenciam tectonismo ora até mesmo passagens transicionais.

- O Supergrupo Espinhaço encontra-se em contato tectônico com Embasamento, como evidenciado pela presença de milonitos próximos desses contatos. A sua subdivisão em dois grupos postulada por Moutinho da Costa et alli (1976), é considerada tendo em vista o empilhamento tectônico e a presença de termos pelito-carbonosos somente no Grupo Superior. O Grupo Espinhaço Médio, sobreposto ao Superior por tectonismo, abrange pacotes de quartzitos arcozianos, subarcozianos, microarcózios e lentes de quartzito puro (**unidades G**), quartzitos sericíticos com passagem ao topo para quartzitos subarcozianos (**unidade F**) e uma seqüência de quartzitos puros, recristalizados, com intercalações de metaconglomerado (**unidade E**). O Grupo Espinhaço Superior compreende três unidades: **unidade D** - consiste em um espesso pacote de filitos carbonosos, com intercalações de metassiltitos carbonosos; **unidade C** - constituída por quartzitos finos e metassiltitos, todos esses carbonosos; e a **unidade B** - a qual contém inúmeros bancos de quartzitos puros intercalados por metassiltitos carbonosos.

Rochas básicas aparecem intrudidas em forma de soleiras ao longo dos planos de empurrão, e sobrepondo-se em discordância com as unidades do Pré-cambriano, encontram-se sedimentos areno-argilosos, que constituem as formações de chapada (**unidade A2**) e os leques aluvio-coluvionares compostos de sedimentos arenosos com variável grau de oxidação (**unidade A1**).

No tocante à geotectônica, a área em apreço reflete a inflexão da faixa de dobramento Araçuaí em torno da borda do Craton do São Francisco. O arqueamento das seqüências do Espinhaço, desenvolvido nessa região, descreve essa relação. Camadas com direção N-NNE e mergulhos subverticais são rebatidas para a direção N-NNW e mergulhos subhorizontais do norte para o centro da área (Figura 5.36). Associado a essa flexura, desenvolveram-se alinhamentos estruturais com direção E-ENE, pronunciadamente no leste da área de estudo (Figura 5.37).

Esses alinhamentos representam zonas de cisalhamento que cortam indistintamente tanto as unidades do Supergrupo Espinhaço como as mais antigas. Elas são constituídas por quartzo-milonitos e filonitos. Do ponto de vista da prospecção mineral, essas estruturas devem ter exercido um papel importante no condicionamento das mineralizações de ouro da região, como evidenciado pela presença de ocorrências conhecidas e amostras positivas de concentrado de bateia, ao longo de suas extensões (Figura 5.37).

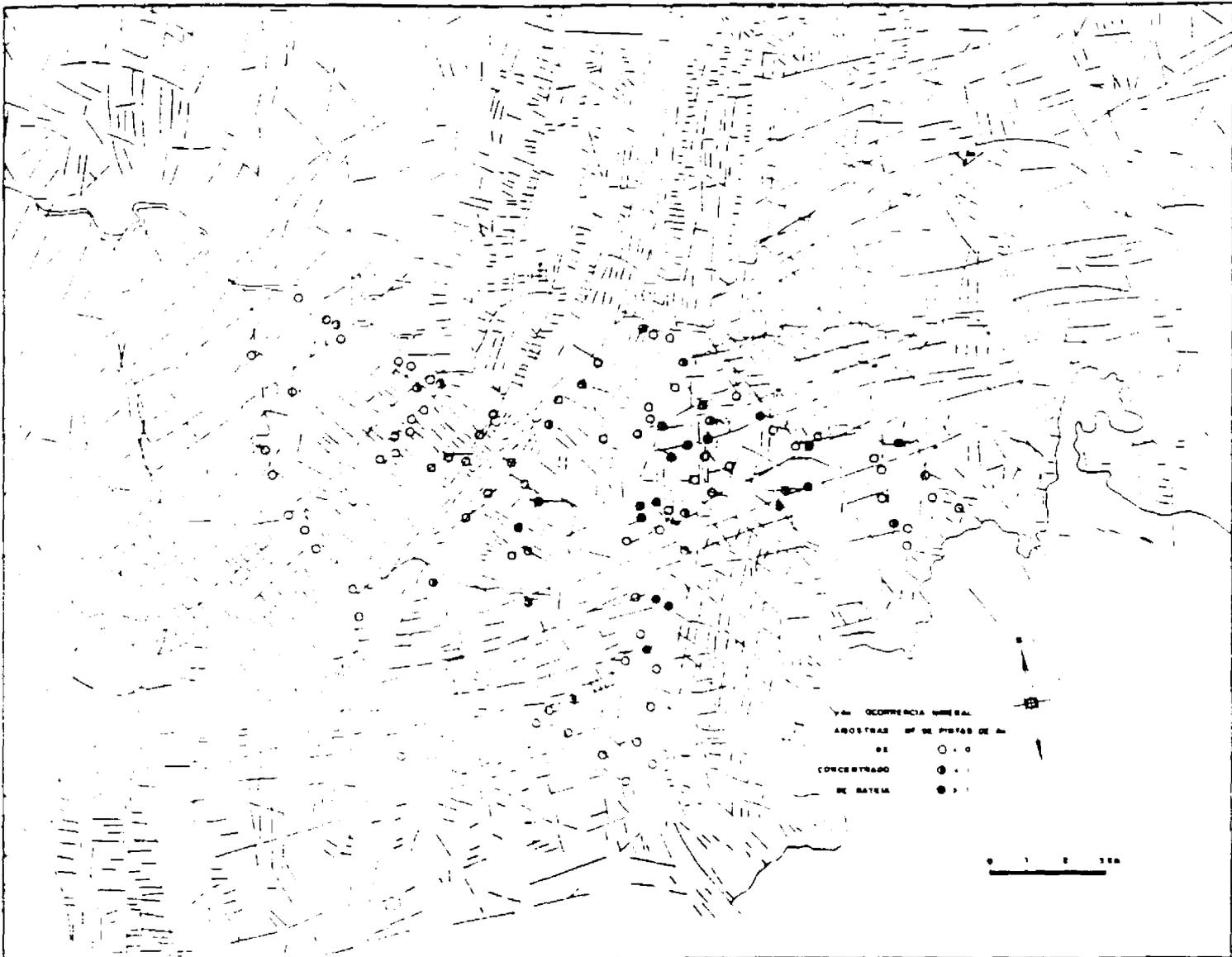


Fig. 5.37 - Mapa de fotolineamentos.
 Dados de concentrado de bateia por Bernadi (1988).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos pelas técnicas de processamento de imagens, pela fotointerpretação e pelos dados de campo, chegou-se às principais conclusões e decorrentes sugestões.

A técnica utilizada para a classificação da vegetação foi eficiente no tocante ao mapeamento da cobertura vegetal verde. A presença, em proporções semelhantes à das classes em questão, na imagem da época seca permitiu que, após a padronização dos dados e a transformação IHS, essas fossem definidas em função da característica de bimodalidade do histograma do canal H. Todavia, a não-inclusão no estudo do componente de sombra impossibilitou a separação de áreas cobertas por uma densa vegetação seca da designada classe de solo-rochas.

A vegetação verde adicionou contraste visual nas composições formadas com a banda 4 (segundo nível de informação), auxiliando a fotointerpretação de litologias e estruturas. Para a região de estudo, esse contraste é mais nítido na imagem da época seca. O desenvolver da estação de chuvas leva a uma maior expressão e recobrimento na imagem da classe vegetação, o que resulta numa perda desse contraste proporcionado por fatores geobotânicos. No entanto os tripletos de bandas da imagem de 15/10/85 apresentaram os maiores volumes de informação obtidos pelos métodos teóricos. Como a totalidade dessa informação não foi prontamente reconhecida nesses produtos, deve-se ainda testá-los quanto ao seu potencial

de informação geobotânica, utilizando de técnicas de realce digital de imagens.

Diferentes tipos de vegetação no estágio sazonal equivalente ao final da estação de chuvas são espectralmente mais homogêneas. Já, dados espectrais de solos e rochas formam elipsóides de informação estirados ao longo da linha cinza do cubo RGB. Admite-se que o maior conteúdo de informação obtido para a imagem de 15/10/85 deve-se à maior proporção de misturas entre a vegetação verde e as áreas de exposição de solos e rochas, o que é explicado pela fase de emergência e crescimento diferencial da vegetação comum nessa época do ano.

As melhores composições selecionadas para todas as imagens sem a exclusão da classe vegetação foram 3-4-5, 4-5-7, 1-4-5. Tal resultado sugere a potencialidade dessas composições para aplicações em estudos geobotânicos. Já, a exclusão progressiva da classe vegetação no cômputo estatístico dos dados leva a uma substituição da banda 4 pela 7 nos primeiros tripletos classificados.

Os métodos globais de seleção de bandas empregados apresentaram resultados convergentes e mostraram-se eficazes quanto à classificação dos tripletos de bandas originais com melhor mostra de informação. Devido ao maior embasamento teórico do método de Sheffield (1985), propõe-se a sua utilização como uma medida de conteúdo de informação de imagens multiespectrais.

Embora se tenha obtido pelo método de George e Dusseault (1986) uma razoável estimativa dos parâmetros estatísticos das razões de bandas, o emprego do método de Sheffield (1985), a partir tanto dos parâmetros estimados

como dos calculados, não foi eficaz na determinação de tripletos de razão de bandas mais informativos. Isto se explica possivelmente devido à influência do ruído residual e da variação tonal, causada pela impressão topográfica remanescente nesse processo, no valor da variância.

As imagens TM/Landsat-5, época seca, realçadas pelas técnicas de processamento digital, possibilitaram a discriminação espectral de diversas litologias, embora seja importante observar as restrições colocadas pela densa cobertura vegetal seca e pelas diferentes expressões superficiais dessas litologias no que tange à posição topográfica, tipo de alteração e processos de formação de solos. A implementação de técnicas de misturas (que envolvem os componentes vegetação verde, sombra e área de exposição de solos e rochas) no tratamento de imagens é recomendada para aplicações em estudos espectrais de materiais geológicos em regiões com significativa cobertura vegetal.

As composições mais indicadas para a discriminação de materiais geológicos de um modo genérico são os produtos 7R5G3B e 7R5G1B gerados pelo processo de decorrelação de bandas. Por sua vez, razões de bandas 3/1, 5/1 e 5/3 otimizaram a detecção de alvos geológicos específicos.

A composição híbrida obtida com a substituição da banda 5 após o processo de decorrelação pela primeira componente principal filtrada foi superior à fusão IHS no que se refere à integração dos atributos espectrais e espaciais. Para análise somente dos atributos espaciais, recomenda-se a utilização, de preferência, da banda 4 filtrada.

A metodologia adotada neste trabalho possibilitou o refinamento da cartografia geológica da área de estudo para uma escala de semidetalhe, comprovando a validade desse tipo de abordagem para aplicação em levantamentos geológicos de regiões fisiográficas e ambientais semelhantes à área em apreço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, J.B.; ADAMS, J.D. Geologic mapping using LANDSAT MSS and TM images : removing vegetation by modelling spectral mixtures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, THEMATIC CONFERENCE: REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3., Colorado Springs, Apr. 16-19, 1984. Proceedings. An Arbor, MI. ERIM, 1984, v.2,,p 615-622.
- ALMEIDA, F.F M. de. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências. 7(4):349-364, 1977.
- ALMEIDA FILHO, R.; VITORELLO, I. Enhancement of digital images through band ratios techniques for geological applications. São José dos Campos, Inpe, Dec. 1982. 22 p. (INPE-2604-PRE/250).
- BANNIGER, C. Assessment of multitemporal Landsat MSS data for geobotanical remote sensing in spanish pyrite belt. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 19. Ann Arbor, 1985. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1985, V. 1, p. 21-25.
- BAUMGARDNER, M.F.; STONER, E.R. Soil mineralogical studies by remote sensing. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 12., 1982. Proceedings. s.n.t. p. 419.
- BERNADI, A.V. Resultados da prospecção de semidetalhe da região 7, Rio Pardo de Minas. Arquivo Técnico da Metamig, Belo Horizonte, 1988.

- BIRD, A.C.; GARRARD, G.R.; ILES, A.R.; LOUGHLIN, W.P. An investigation of spectral signatures from mineralized rock outcrop as defined by airborne TM data of the Saudi Arabian shield. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING, 3., Les Arcs. Dec., 16-20, 1985. Proceedings. Paris, ESA, 1986. p. 413-417. (ESA-SP 247).
- BIRNIE, R. Applications of remote sensing to geobotanical prospecting for non-renewable resources. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL DE LA COMMISSION VII DE LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DE PHOTOGRAMMETRIE ET TELEDETECTION, Toulouse, 1982. Actes. Toulouse, ISPRS, 1982, v. 24-VII/2, p. 165-178.
- BLODGET, H.W.; GUNTHER, F.J.; PODWYSOCKI, M.H.
Discrimination of rock types and alteration products in South Western Saudi-Arabia with computer enhancement of LANDSAT data. Washington, DC, NASA GSFC, 1978, 34 p. (NASA Techn. Pap. 1327).
- BLUSSON, A.; ABRAMS, M.; NGUYEN, P.T.; MASSON, P.
Structural analysis of Cevennes (France) using multiple data types. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, THEMATIC CONFERENCE REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 3., Colorado Springs, April, 16-19, 1984. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1984, v. 1, p. 417-423.
- BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO. Brasília, INMET, 1984-87.
- BOWKER, D.E.; DAVIS, R.E.; MYRICK, D.L.; STACY, K.; JONES, W.T. Spectral reflectances of natural targets for use on remote sensing studies. Washington, D.C. NASA, 1985. 181 p. (NASA RP 1139).

- BRITO NEVES, B.B.; KAWASHITA, K.; CORDANI, U.G.; DELHAL, J. A evolução geocronológica da Cordilheira do Espinhaço; dados novos e integração. Revista Brasileira de Geociências, 9(1):71-85, 1979.
- CANAS, A.A.; BARNETT, M.E. The generation and interpretation of false-color composite principal component images. International Journal of Remote Sensing, 6(6):867-881, June 1985.
- CAVAYAS, F. Modelling and correction of topographic effect using multitemporal satellite images. Canadian Journal of Remote Sensing. 13(2):49-67, Dec. 1987.
- CHAVES JR., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, 24:459-479, 1988.
- CHAVES JR., P.S.; GRAYDON, L.B.; SOWERS, L.B. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. Journal of Applied Photographic Engineering, 8(1):23-30, Feb. 1982.
- COLLINS, W.; CHANG, S.H.; RAINES, G.; CANNEY, F.; ASHLEY, R. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits. Economic Geology, 78(4):737-749, July 1983.
- CONDIE, K.C. Archean greenstone belts. New York, N.Y. Elsevier, 1981, 423 p.
- CORREIA, V.R. de M. Estudos de medidas de qualidade para estimação de proporções de classes em elementos de resolução de imagens. São José dos Campos, INPE, 1983. (INPE-2712-TDL/131).

DRURY, S.A. Applications of digital image enhancement in regional tectonic mapping of south India. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 18. Paris, 1984. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1984, v. 3, p. 1895-1904.

_____ Remote sensing of geological structure in temperate agricultural terrains. Geological Magazine, 123(1):113-120, 1986.

DYRSTRA, J.D.; SHEFFIELD, C.A.; EVERETT, J.R. Evaluation of LANDSAT-4 Thematic Mapper data as applied to geologic exploration: summary of results. In: LANDSAT-4 EARLY RESULTS SYMPOSIUM, Greenbelt, MD, 6, Dec., 1983. Proceedings. Washington, DC, NASA GSFC, 1984. v. 2, p. 103-108. (NASA CP-2326).

ENGEL, S.L.; WEINSTEIN, O. Thematic mapper: an overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE 21(3):258-265, July 1983.

FENG, M. Toward intelligent image processing for geological applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. THEMATIC CONFERENCE: REMOTE SENSING FOR EXPLORATION, San Francisco, CA, 1985. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1985, v. 2, p. 745-754.

FERNANDES, P.E.C.A.; MONTES, M.L.; BRAZ, E.R.; MONTES, A.S.L.; SILVA, L.L.; OLIVEIRA, F.L.L.; GHIGNONE, J.C.; SIGA JR., O.; CASTRO, H.E.F. Geologia. Projeto RADAMBRASIL; Folha SD.23/ Brasília. Rio de Janeiro, DNPM 1982, cap. 1, p. 25-205. (Levantamento de Recursos Naturais, 29).

GEORGE, H.; DUSSEAULT, M.B. Selection of optimum band-ratio triplets using statistical data of original single-band imagery. Canadian Journal of Remote Sensing, 12(2):114-123, Dec. 1986.

GILLESPIE, A.R.; KAHLE, A.B.; WALKER, R.E. Color enhancement of highly correlated images. I. decorrelation and HSI contrast stretches. Remote Sensing of Environment, 20(1):209-236, Aug. 1986.

_____ Color enhancement of highly correlated images. II Channel ratio and "chromaticity" transformation techniques. Remote Sensing of Environment, 22(3):343-365, Aug. 1987.

GOETZ, A.F.H.; BARRETT, N.R.; ROWAN, L.C. Remote sensing for exploration: an overview. Economic Geology, 78(4):573-590, June/July 1983.

GREEN, R.G.; ARVIDSON, R.; SULTAN, M.; GUINNESS, E. Geobotanical information contained in Landsat thematic mapper images covering southern Missouri. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, THEMATIC CONFERENCE: REMOTE SENSING FOR EXPLORATION, 4., San Francisco, CA. Apr. 1-4, 1985. Proceedings. An Arbor, MI, Erim, 1985, v. 1., p. 371-380.

GREENBAUM, D. Lithological discrimination in central snowdonia using airborne multiespectral scanner imagery. International Journal of Remote Sensing, 8(6):799-816, June 1987.

- HAYDN R.; DALKE, G.N.; HENKEL, J.; BARE, J.E. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, THEMATIC CONFERENCE: REMOTE SENSING OF ARID AND SEMI-ARID LANDS, 1., Cairo, Jan. 19-25, 1982. Proceedings. An Arbor, MI, Erim, 1982, v. 1, p. 599-616.
- HORNSBY, J.; RENCZ, A.N.; BONHAN-CARTER, G.F. Comparison of techniques for enhancing geologic lineaments from Landsat data, with application to the Nahanni Area, Yukon Territory. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 9., St. John's, Newfoundland, 1984. Proceedings. Ottawa, Canada Centre on Remote Sensing, 1984, p. 387-392.
- HOVIS JR., W.A.; CALLAHAN, W.R. Infrared reflectance spectra of igneous rocks, tuffs, and red sandstone from 0.5 to 22 μ m. Journal of the Optical Society of America, 5(56):639-643, May 1966.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: VII. Acid igneous rocks. Modern Geology, 4(1):217-224, 1973.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: IX. Basic and ultrabasic igneous rocks. Modern Geology, 5(1):15-22, 1974.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: Sedimentary rocks XI. Modern Geology, 5(4):211-212, 1976a.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: Metamorphic rocks XII. Modern Geology, 5(4):219-228, 1976b.

- HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 42(3):501-513, Apr. 1977.
- II, F.A.M. Seleção de atributos aplicada a imagens multiespectrais. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2303-TDL/072).
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Sistema de tratamento de imagens, manuais do usuário. São José dos Campos, INPE DPI LTID, nov. 1986.
- KNEPPER JR., D.H.; RAINES, G.L. Determining stretch parameters for lithologic discrimination on Landsat MSS band-ratio images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51(1):63-70, Jan. 1985.
- KREJCI, L.C; FORTUNATO, F.F.; CORRÊA, P.R.S. Pedologia. Projeto RADAMBRASIL. Folha de Brasília/SD23. DNPM. Rio de Janeiro, 1982, cap. 3, p. 297-460. (Levantamento de Recursos Naturais, 29).
- LADEIRA, E.A. Metallogenesis of gold at The Morro Velho Mine and in The Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Ph.D. Thesis. Ontario, Univ. of Western Ontario, 1980.
- LEES, R.D.; LETTIS, W.R.; BERNSTEIN, R. Evaluation of Landsat thematic mapper for geologic applications. Proceedings of IEEE, 73(6):1108-1117, 1985.

- LIMA, M.I.C. de; FONSECA, E.G. da; OLIVEIRA, E.P. de; GHIGNONE, J.I.; ROCHA, R.M.; CARMO, U.F. do; SILVA, J.M.R. da; SIGA JR, O. Geologia. Projeto RADAMBRASIL; Folha 3024/Salvador. Rio de Janeiro, DNPM. 1981, cap. 1, p. 25-192. (Levantamento de Recursos Naturais, 24).
- LULLA, K. Some observations on geobotanical remote sensing and mineral prospecting. Canadian Journal of Remote Sensing, 11(1):17-39, Jul., 1985.
- MASCARENHAS, J.F. O embasamento precambriano no Estado da Bahia e sua gênese. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRATON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, Salvador, 1979. Anais., SBG, 1981, p. 34-38.
- MAURO, C.A. de; DANTAS, M.; ROSO, F.A. Geomorfologia. Projeto RADAMBRASIL; Folha de Brasília/SD23. Rio de Janeiro, DNPM. 1982, cap. 2, p. 205-296. (Levantamento de Recursos Naturais, 29).
- MENESES, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor "Thematic Mapper" do Landsat-5 para discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semi-detalhe. Tese de Doutorado em Geologia. São Paulo, IGUSP, 1986, 233 p.
- MOORE, G.; WALTZ, F.A. Objective procedures for lineament enhancement and extraction. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49(5):641-647, May 1983.
- MORAES, L.C. et al. Projeto Brumado-Caetité; relatório final. Salvador. DNPM/CPRM, 1980. 9 v. v. 1.

- MOUAT, D.A. The response of vegetation to geochemical conditions. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. THEMATIC CONFERENCE: REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 2., Fort Worth, TX, Dec. 6-10, Proceedings. Ann Arbor, MI, Erim, 1982, v. 1, p. 75-83.
- MOUTINHO DA COSTA, L.A. et al. Projeto leste do Tocantins/oeste do Rio São Francisco; relatório final. Rio de Janeiro. DNPM/CPRM/PROSPEC, 1976. 11 v. (Relatório do Arquivo Técnico da DEM 2547).
- PARADELLA, W.R. Discriminação de unidades litológicas no baixo vale do rio Curaçá (Bahia), através de realces por processamento digital de dados MSS-Landsat 3. Tese de Doutorado em Geologia, São Paulo, IGUSP, 1983, 250 p.
- PEDREIRA, A.J.; KISHIDA, A.; TORQUATO, J.R.; MASCARENHAS, J.F. Inventário e reavaliação do conhecimento geológico da parte central do craton do São Francisco. In: REUNIÃO PREPARATÓRIA PARA O SIMPÓSIO SOBRE O CRATON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, Salvador, Ago. 1977. Anais. Salvador, SBG, Dez. 1978. p. 67-154. (Publicação Especial, 3).
- PODWYSOCKI, M.H.; SALISBURY, J.W.; BENDER, L.V.; JONES, O.D; MIMMS, D.L. Analysis of LANDSAT-4 TM data for lithologic and image mapping purposes. In: LANDSAT-4 EARLY RESULTS SYMPOSIUM, Greenbelt, MD, Dec. 6., 1983. Proceedings. Washington, DC, NASA. GSFC, 1984, v. 2, p. 35-39. (NASA CP-2326).
- ROTHERY, D.A. Decorrelation stretching as an aid to image interpretation. International Journal of Remote Sensing, 8(9):1253-1254, Sept. 1987.

- SCHOLL, W.V.; FOGAÇA, A.C.C. Estratifigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina (MG). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA, MINAS GERAIS, 1., Diamantina, 1979. Atas. Belo Horizonte, SBG. Núcleo de Minas Gerais. 1979, p. 55-73.
- SCHOWENGERDT, R.A. Techniques for image procesing and classification on remote sensing. New York, NY, Academic, 1983. 249 p.
- SHEFFIELD, C. Selecting band combinations from multiespectral data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51(6):681-687, June 1985.
- SIEGAL, B.S.; GOETZ, A.F.H. Effect of vegetation on rock and soil type discrimination. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 43(2):191-196, Feb. 1977.
- SILVA, S.B. da; ASSIS, J.S. Vegetação. Projeto RADAMBRASIL; Folha SP 23/Brasília. Rio de Janeiro, DNPM. 1982, cap. 4, p. 461-528. (Levantamento de Recursos Naturais, 29).
- SLATER, P.N. Remote sensing optics and optical systems. London, Addison-Wesley, 1980. 575 p.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, 16(32):107-121, 1976.
- TUCKER, C.J.; ELGIM, J.H.; McMURTREY III, S.E.; FAN, C.S. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. Remote Sensing of Environment, 8:237-248, 1979.

- ULHEIN, A; CHAVES, M.J.C.; DOSSIN, I.A. Recursos minerais da Serra do Espinhaço Meridional (MG): Uma síntese baseada no contexto litoestratigráfico regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., Goiânia, 1986, Anais. Goiânia, SBG, 1986, p. 2453-2464.
- VIERA, F.W.R. Gênese das mineralizações auríferas da Mina de Raposos. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 4., Belo Horizonte, 1987. SBG. Núcleo de Minas Gerais, 1987, 9 p. 358-368 (Boletim nº 7).