

IMAGENS DO SATÉLITE SPOT-1 EM MAPEAMENTO GEOLÓGICO: UM ESTUDO COMPARATIVO COM VÁRIOS PRODUTOS SENSORES NO VALE DO RIO CURAÇA, BAHIA*

WALDIR RENATO PARADELLÁ**, ÍCARO VITORELLO**, CHAN CHIANG LIU**,
JUÉRCIO TAVARES DE MATTOS**, LUCIANO VIEIRA DUTRA**, PAULO ROBERTO MENESES***

ABSTRACT SPOT-1 IMAGERY IN GEOLOGIC MAPPING: A COMPARATIVE STUDY WITH SEVERAL REMOTE SENSING PRODUCTS IN THE CURAÇA RIVER VALLEY, BAHIA. The advent of new remote sensing products from TM-LANDSAT and SPOT with geologically interesting technical characteristics but higher acquisition prices compared to the MSS, brought up the need of performance evaluation in the Brazilian territory. The goal of the present work is to qualitatively compare the spatial and spectral performances of multispectral and panchromatic SPOT under oblique viewing with TM and MSS-LANDSAT and air photos in the context of structural and lithological mapping. The test area with nearly 900 km² is located in the lower Valley of Curaça River, Northeast of Brazil (State of Bahia) and is characterized by precambrian terrains in a semiarid environment. Photographic paper products were submitted to visual analysis to appropriate scales for regional and local mapping, and digital data were subjected to enhancement and merging processing. Additionally, digital data were normalized into radiometric values with the purpose of detecting oblique viewing effects. Radiometric values from west pointing SPOT and nadir TM from the same sites have shown differences that can be attributed to the greater atmospheric interference in the SPOT viewing configuration. Such difference is greatest at the shorter wavelengths and decreases towards the near infrared, but without serious degradation in the context of the present study. At the regional scale, neither SPOT nor TM-LANDSAT, in photographic paper products, have added significant geological information to the previous map based on computer processed MSS-LANDSAT data. However, computer merged products have shown that lithological discrimination can be enhanced by the combination of the high spatial resolution SPOT panchromatic image with the geologically important infrared TM bands. Similarly, the stereo vision provided by SPOT pairs can be combined with processed TM products to optimize interpretation at local scales. Whereas the latter requires expensive digital processing, the stereoscopic vision need a pair of opposing oblique viewing obtained under clear atmospheric conditions and a special schedule in the satellite coverage, which represent additional difficulties in the acquisition of SPOT stereo data.

Keywords: SPOT-1, sensor evaluation, remote sensing, TM-LANDSAT, geology, lithological discrimination.

RESUMO O advento de novos produtos de sensores remotos do TM-LANDSAT e SPOT, com características técnicas interessantes do ponto de vista de aplicação geológica, mas de custos mais elevados que os do MSS-LANDSAT, levou a necessidade de uma avaliação da performance destes produtos no território brasileiro. A área teste com aproximadamente 900 km² está localizada no baixo vale do Rio Curaça, nordeste do Brasil (Estado da Bahia), e é caracterizada por terrenos pré-cambrianos em um ambiente semi-árido. O objetivo do presente estudo é o de comparar qualitativamente o desempenho espacial e espectral de dados SPOT multiespectral e pancromático, em condições de visada oblíqua, com dados do MSS e TM-LANDSAT e fotos aéreas pancromáticas, no contexto de mapeamento estrutural e discriminação litológica. Imagens em papel foram analisadas visualmente, em escalas adequadas a mapeamento regional e de detalhe, e os dados digitais foram submetidos a processamentos de realce e de integração (merging). Adicionalmente, os dados digitais foram normalizados em valores radiométricos com o propósito de detecção de efeitos da visada oblíqua. Valores radiométricos da visada para oeste do SPOT e *nadir* para o TM do mesmo sítio mostraram diferenças que podem ser atribuídas à maior interferência atmosférica na configuração de visada SPOT. Tais diferenças são maiores nos comprimentos de onda mais curtos e decrescem em direção ao infravermelho próximo, porém sem degradações mais sérias no contexto do presente estudo. Na escala regional, nem SPOT nem TM-LANDSAT, em imagens em papel, adicionaram informações geológicas significativas ao mapeamento anterior baseado em dados digitais MSS-LANDSAT. Contudo, produtos obtidos da integração SPOT/TM (merged) mostraram que discriminações litológicas podem ser melhoradas pela combinação da elevada resolução espacial da banda pancromática do SPOT com as bandas do infravermelho do TM. Do mesmo modo, a visão estereoscópica fornecida pelo SPOT pode ser combinada com produtos TM realçados digitalmente na otimização de interpretação a escalas de detalhe. Enquanto os dados TM requerem processamento digital de custo mais elevado, a visão estereoscópica do SPOT requer imageamentos em visada oblíqua oposta sob boas condições atmosféricas e uma programação com muita antecedência no recobrimento pelo satélite, o que representa dificuldades adicionais na obtenção dos dados SPOT.

Palavras-Chaves: SPOT-1, avaliação de sensor, sensoriamento remoto, TM-LANDSAT* geologia, discriminação litológica.

INTRODUÇÃO A disponibilidade de dados MSS (*Multispectral Scanner Subsystem*) do Program LANDSAT, desde o início dos anos 70, tem se constituído em ferramenta adicional à investigação geológica no País. Tais dados têm sido utilizados ou na forma de imagens em papel fotográfico (Amaral *et al* 1976, Liu *et al* 1980, Soares *et al* 1982, Liu 1984, Mattos 1986) ou na forma digital (Paradella & Almeida Filho 1976, Vitorello & Paradella 1984, Almeida Filho 1984). Contudo, a contribuição destes dados em investigações de

maior detalhe tem sido limitada por várias razões, destacando-se a baixa resolução espacial e espectral e a ausência de estereoscopia.

Atualmente, dados de dois novos sistemas sensores, o TM (*Thematic Mapper*) do satélite norte-americano LANDSAT-5 e o HRV (*Haute Resolution Visible*) do francês SPOT-1, estão disponíveis no Brasil. Dentro deste contexto, é oportuna uma avaliação do desempenho dos produtos desses sistemas em mapeamento geológico. Foi escolhida como área-teste o Baixo

* Pesquisa conduzida dentro do PROGRAMME DEVALUATION PRELIMINAIRE SPOT (PEPS), convênio/CNES-SPOT IMAGE, proposta n^o 304

** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515, CEP 12201, São José dos Campos, SP, Brasil

*** Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, CEP 70910, Brasília, DF, Brasil

Vale do Rio Curaçá, já mapeado na escala de 1:50.000 (Jordan 1968, Delgado & Souza 1975) e objeto de avaliação recente por imagens digitais MSS-LANDSAT (Paradella 1986a). No presente trabalho, a pesquisa envolveu imagens e fitas magnéticas dos sensores MSS e TM do LANDSAT, HRV do SPOT, além de fotos aéreas pancromáticas obtidas pelo recobrimento da aérea teste pela FAB em 1972.

DADOS TM-LANDSAT E HRV SPOT Em março de 1984, foi lançado pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) o LANDSAT-5, com o sensor TM. Em vários aspectos, o TM é uma extensão do MSS. Os quatro canais do MSS foram ampliados para sete no TM, com a inclusão de dois canais no infravermelho refletidos (TM5 e TM7) e um no infravermelho emitido (TM6). Em adição, as larguras espectrais dos canais foram sensivelmente reduzidas, a resolução espacial consideravelmente melhorada de 82 para 30 m e a digitalização (quantização) acrescida de 6 para 8 bits, isto é, o intervalo dinâmico de gradações de cinza entre o preto e o branco nas imagens aumentou de 64 para 256 níveis de cinza. Cada cena TM cobre 90 x 90 km em tomada vertical. Permaneceu, entretanto, a ausência de capacidade estereoscópica. Avaliações destas imagens em prospecção mineral e discriminação litológica podem ser encontradas nos trabalhos de Paradella (1986b) e Meneses (1986).

Em fevereiro de 1986, o CNES (*Centre National Etudes Spatiales*) colocou em órbita o SPOT-1 (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*), com dois sensores HRV idênticos. Estes sensores podem ser ativados independentemente e operam em dois modos: multiespectral (XS) e pancromático (P). No multiespectral, a superfície terrestre é observada em dois canais no visível e um no infravermelho próximo (XS1, XS2 e XS3 respectivamente), com 20 m de resolução espacial, e um no modo pancromático, com resolução espacial de 10 m. Tal sistema introduziu novas características no serioramento remoto orbital: **1.** a possibilidade de visão oblíqua à trajetória (*off-nadir*) com o conseqüente aumento da resolução nominal temporal; **2.** a disponibilidade de visão estereoscópica; e **3.** dados com elevada resolução espacial, particularmente no canal do pancromático. Cada cena SPOT-1 cobre uma área nominal de 60 x 60 km na tomada em *nadir*. No caso de visada *off-nadir*, isto é, com visadas laterais em ângulos entre 0° e próximo a 27°, a largura da cena na direção da órbita será sempre 60 km, enquanto seu comprimento longitudinal será função do ângulo de visada e varia de 60 km (*nadir*) a 80 km (\pm 27° com visada para oeste ou leste, como mostra a figura 1. Na tabela 1 são apresentadas as principais características dos produtos MSS e TM do LANDSAT, HRV (multiespectral e pancromático) do SPOT e fotos aéreas pancromáticas utilizadas neste pesquisa.

Muito embora as passagens do LANDSAT e SPOT tenham correspondido à estação seca na área teste, foi impossível a obtenção de passagens da mesma data. Os resultados das precipitações acumuladas, medidas pela Estação de Bebedouro da EMBRAPA (Petrolina/PE) indicaram 25, 10, 122 e 20 mm, para o período de três meses que procedeu as passagens de agosto de 1986 (SPOT com visada para oeste), novembro de 1986 (SPOT com visada para leste), novembro de 1984 (TM) e setembro de 1983 (MSS), respectivamente. As implicações dessas variações serão discutidas posteriormente no texto.

ÁREA TESTE O Baixo Vale do Rio Curaçá está localizado no norte baiano e é caracterizado por rochas do Arqueano ao Proterozóico Superior, de alto e baixo grau metamórfico e estruturação complexa (Jordan 1968, Leube 1972, Delgado & Souza 1975). A região é em sua maior parte plana, com solos fortemente relacionados com o substrato, e com uma vegetação de caatinga com marcante sazonalidade e certos controles geobotânicos, em termos de espécies e densidade

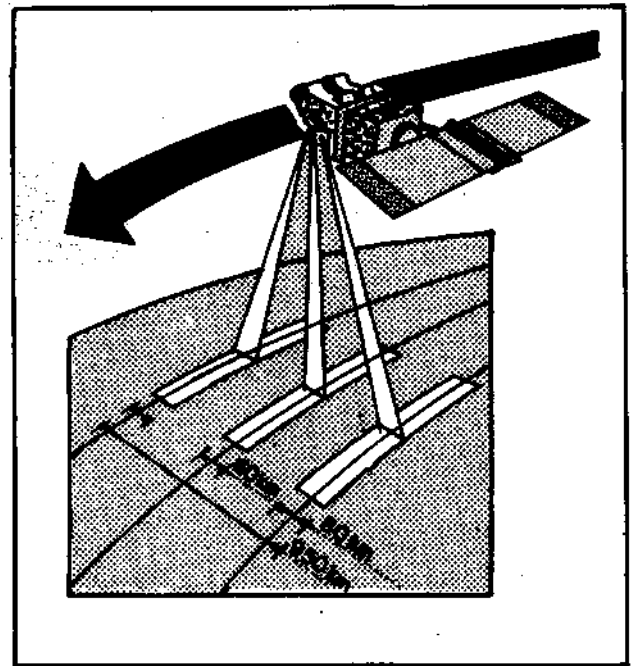


Figura 1 - Variações do ângulo de visada do SPOT-1, pelas quais é possível observar qualquer região no terreno dentro de 950 km de largura com visada no nadir ou oblíqua. As imagens de uma mesma região, tomadas em diferentes datas, com ângulos de visada distintos, formam pares estereoscópicos. Para um par de imagens composto de uma imagem a -27° (visada para leste) e outro a +27° (visada para oeste), a razão B/H é 1. Figure 1 - SPOT-1 viewing angles from which any terrain within a 950 km band width is seen at nadir or obliquity. Images of the same area but taken in different days as opposing viewing angles will form a stereoscopic pair having B/H maximum ratio value of 1 for a -27° east viewing angle and a +27° west viewing angle

Tabela 1 — Características gerais dos sensores MSS e TM do LANDSAT, HRV-1 DO SPOT e fotos aéreas utilizadas nesta investigação

Table 1 - General characteristics of LANDSAT MSS, and TM; SPOT HRV and air photos used in die research

SATÉLITE	SENSOR/CANAL	POSICÃO NO ESPECTRO	CAMPO DE VISADA NO TERRENO	NÍVEL ORIGINAL DE QUANTIZAÇÃO	DATA PASSAGEM	AZIMUTE SOLAR	ELEVAÇÃO SOLAR	ÂNGULO DE VISADA
LANDSAT-4	MSS 1	0,5 - 0,6 µm	82m	64	25/08/83	78°	35°	Nadir
	MSS 2	0,6 - 0,7 µm	82m	64				
	MSS 3	0,7 - 0,8 µm	82m	64				
	MSS 4	0,8 - 0,9 µm	82m	64				
LANDSAT-5	TM 1	0,45 - 0,55 µm	30m	256	22/11/84	114°	57°	Nadir
	TM 2	0,55 - 0,65 µm	30m	256				
	TM 3	0,65 - 0,85 µm	30m	256				
	TM 4	0,75 - 0,9 µm	30m	256				
	TM 5	1,55 - 1,75 µm	30m	256				
	TM 6	2,15 - 2,35 µm	30m	256				
	TM 7	2,15 - 2,35 µm	30m	256				
SPOT-1	HRV-1 XS-1	0,5-0,59 µm	20m	256	18/08/86	31°	34°	23°23' W
	HRV-1 XS-2	0,64-0,69 µm	20m	256	18/08/86	31°	34°	23°27' W
	HRV-1 XS-3	0,75-0,87 µm	20m	256	18/08/86	31°	34°	23°29' W
	HRV-1 P	0,51-0,73 µm	10m	256	18/08/86 e 12/11/86	31° e 130°	34° e 71°	23°27' W e 26°34' E
	Foto Aérea		Pancromática (1:70.000)		27/11/73			Nadir

de cobertura relacionados às unidades litológicas (Paradella 1986a). Na figura 2 é mostrada a distribuição espacial das principais litologias da área teste, as quais servem com referências para as discussões de avaliação dos diferentes produtos sensores.

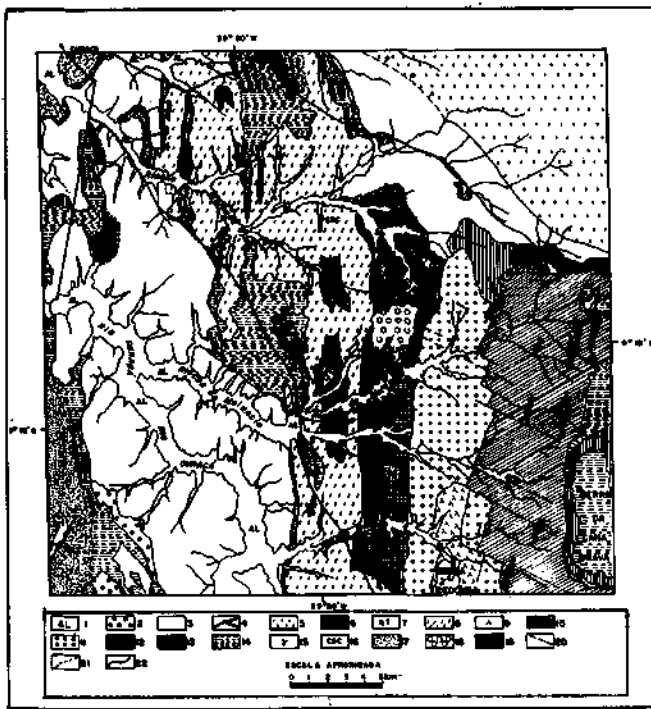


Figura 2 — Unidades litológicas discriminadas no Baixo Vale do Rio Caraça, Bahia, por meio de realces por computador, de dados do MSS-LANDSAT (Paradella 1986a) integrados com dados geológicos de campo e trabalhos prévios (Jordan 1968, Leube 1972, Delgado & Souza 1975). Legenda: 1= depósitos aluvionares; 2=cobertura calcifera; 3=micaxistos efilitos; 4=estrada; 5=micaxistos granatíferos; 6=metamafitos e metaultramafitos; 7=quartzito-ferruginosos; 8=biotita-hornblenda-gnaisses; 9=cataclastos e biotita-gnaisses; 10=biotita gnaisses e quartzo-feldspato gnaisses; 11=biotita-hiperstênio gnaisses; 12=mármore intercalados com filitos; 13=filitos e cálcio-filitos; 14=mármore e metacalcários; 15=sienitos gnaissicos; 16=cálcio-silicáticas; 17=quartzo-feldspato gnaisses; 18=elúvio; 19=migmatitos; 20=falhamentos; 21=contato litológico aproximado; 22=contato litológico

Figure 2 - The main lithological units discriminated in the Curaçá Valley from computer enhancements of MSS-LANDSAT data (Paradella 1986a) integrated with geological information from field work and previous studies (Jordan 1968, Leube 1972, Delgado & Souza 1975). Legend: 1= Alluvium; 2=sandy-argillaceous calcitic cover, 3=mica schists and phyllites; 4=roads; 5=gamet-mica schists; 6=metamafics and meta-ultramafics; 7=ferruginous quartzites; 8=biotite-hornblende-gneisses; 9=cataclastites and biotite-gneisses; 10=biotite-gneisses and quartz-feldspathic gneisses; 11=biotite-hypersthene gneisses; 12=marbles intercalated with phyllites; 13=phyllites and calc-phyllites; 14= marbles; 15=gneisses syenites; 16=calc-silicates; 17=quartz-feldspathic gneisses; 18=eluvium; 19=migmatites; 20= faults; 21=approximately located contact; 22=lithologic contact

ESQUEMA DE ABORDAGEM Quatro níveis de abordagem foram enfocados nesta pesquisa (Fig. 3). Primeiramente, dentro de um contexto regional (escala de 1:200.000), foram realizadas fotointerpretações para o módulo A, com base em exame monoscópico de dados multispectrais, MSS, TM e SPOT, e estereoscópico com a imagem pancromática SPOT. Na segunda fase, foi avaliada a contribuição dos atributos espaciais em discriminação litológica e caracterização estrutural, por meio de análise estereoscópica, a partir de dados pancromáticos das fotos aéreas (escala de 1:70.000) e imagem SPOT (1:100.000) para o módulo B na figura 3. A terceira fase de pesquisa incluiu uma análise semi-quantitativa

da separabilidade espectral de várias unidades litológicas a partir de dados digitais multispectrais TM e SPOT para os módulos C da área teste. Adicionalmente, foram avaliados também resultados de processamento digital de imagens com várias técnicas de realce. Na última fase da investigação, foram avaliados produtos da combinação de dados digitais TM e SPOT para a área correspondente ao módulo D da figura 3.

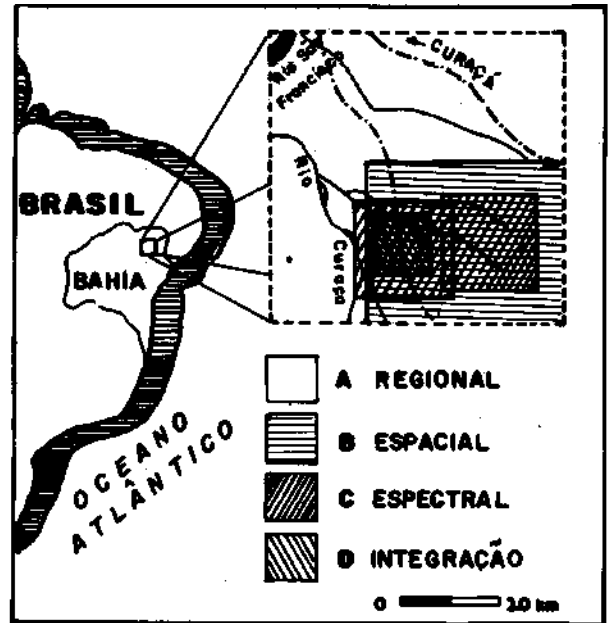


Figura 3 - Níveis de abordagens seguidos na investigação
Figure 3 - Indication of the approach modules used in the research areas

Tabela 2 - Valores obtidos com base nos resultados da figura 4, de acordo com o grau de discriminação litológica
Table 2 - Rate values according to the degree of lithological discrimination based on results from figure 4

TIPO LITOLÓGICO	SENSOR		VISÃO	
	MSS	TM	MONOSCÓPICA	ESTEREOSCÓPICA
Depósitos aluvionares	2	3	4	4
Elúvio	0	0	3	4
Cobertura calcifera	0	3	3	3
Calcário calcifera	2	2	2	2
Micaxistos e filitos	3	4	4	4
Filitos e cálcio-filitos	1	4	4	4
Mármore intercalados com filitos	0	2R	2R	2R
Mármore/metacalcários	3	2R	2R	2R
Micaxistos granatíferos	3	4	4	4
Sienito gnaissico	3	4	4	4
Metamafitos/metaultramafitos	0	2	2	2
Cálcio-silicáticas	0	0	0	2
Quartzito ferruginoso	4	4	4	4
Quartzo-feldspato gnaissico	3	3	2	2
Biotita-hornblenda gnaissico	0	0	0	0
Biotita-hiperstênio gnaissico	0	3	0	0
Cataclastos/biotita-gnaissico	0	0	0	0
Migmatitos	0	0	0	0
Biotita gnaissico/quartzo gnaissico	0	3	1	1
Somatória	24	43	41	44

RESULTADOS E DISCUSSÕES Contexto Geológico Regional Uma fotointerpretação independente do módulo A da figura 3 foi feita a partir de imagens em preto e branco, na escala de 1:200.000, para o LANDSAT (MSS e TM) e SPOT (Fig. 4).

Em seguida, os resultados mostrados na figura 4 foram comparados com o mapa geológico da figura 2 e atribuídos valores (pesos), de acordo com o grau de discriminação das litologias observadas, na tentativa de quantificar diferenças na discriminação dos vários produtos analisados. Na tabela 2, os

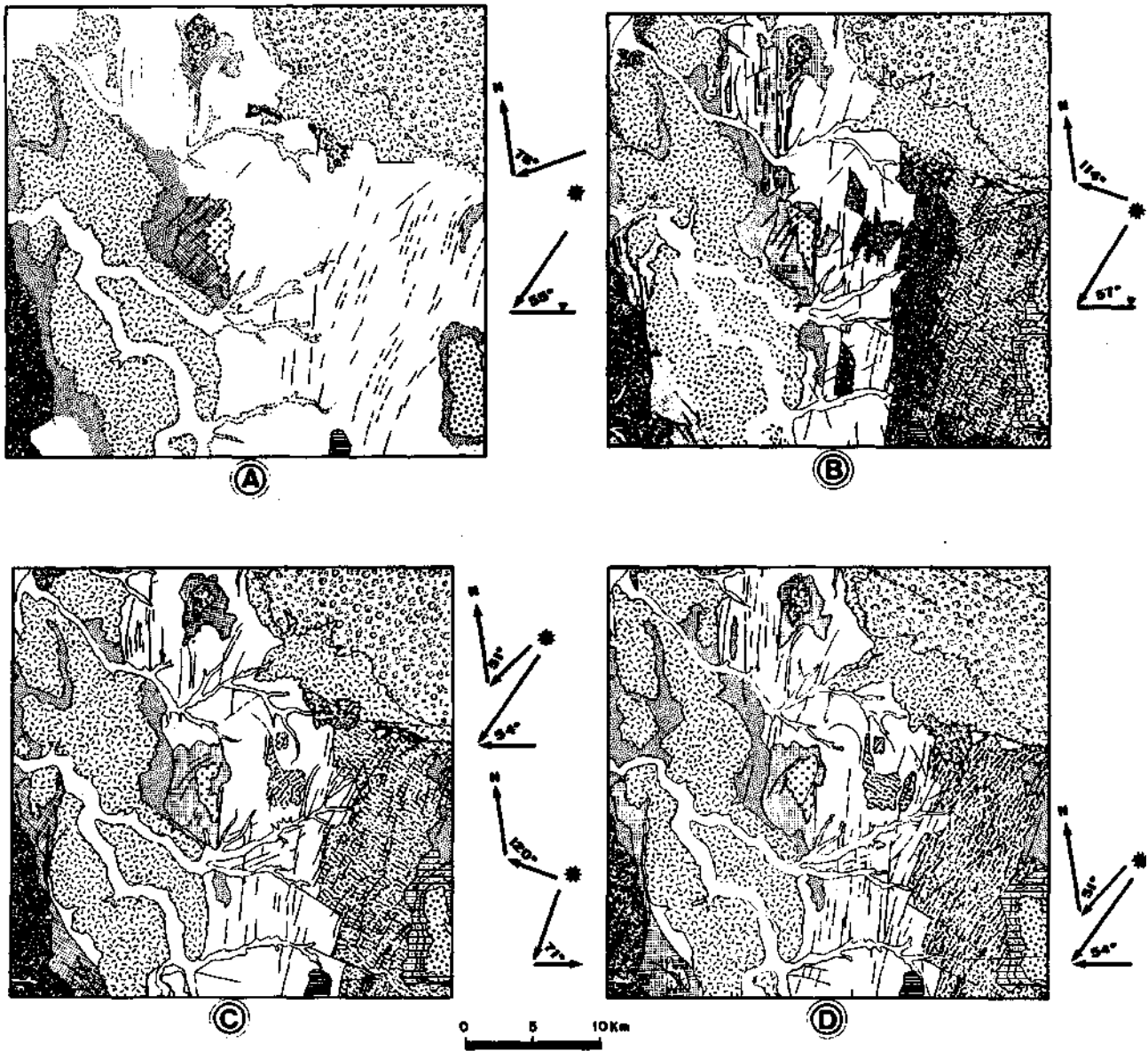


Figura 4 - Mapas de unidades litológicas e estruturas fotointerpretadas de imagens em papel fotográfico, obtidos do MSS(A), TM(B) e SPOT multiespectra (C) e pancromático(D). Neste último caso, a interpretação foi realizada sobre pares estereoscópicos de imagens com visada para leste (elevação solar de 71°) e outra para oeste (elevação solar de 54°). Ao lado de cada mapa encontram-se os ângulos de azimute e elevação solar de cada imagem, interpretada na escala original de 1:200.000

Figure 4 - Maps of lithological units and structures photointerpreted from LANDSAT-MSS(A); TM(B); and SPOT multispectral (C) and SPOT panchromatic (D); paper products at the 1:200,000 scale. In the latter, the photointerpretation was based on stereoscopic pair formed by an east viewing image (solar elevation angle of 71°) and a west viewing image (solar elevation angle of 54°). The azimuth angle and solar elevation angle are shown in the side of each frame

valores atribuídos foram: 4 = quando a discriminação é evidente e concorda com o mapa geológico; 3 = menos óbvio, mas ainda em concordância com o mapa; 2 = evidente, mas em menor concordância, 1 = evidente, mas apenas parcialmente concordante; 0 = não discriminada. A letra R na tabela 2 indica evidência em dois ou mais produtos, mas pouca ou nenhuma concordância com o mapa. Conclusões preliminares indicam que não existem diferenças significativas, em termos de discriminação litológica por fotointerpretação, entre SPOT (mono e estereovisão) e TM (monovisão), para a escala regional de trabalho, mas ambos são bastante superiores ao MSS.

Adicionalmente, um gráfico de comprimento acumulativo, de feições lineares de acordo com a direção, foi também obtido para os quatro produtos (Fig. 5).

O TM apresentou os maiores valores acumulados, prova-

velmente devido à direção de iluminação solar mais favorável, isto é, aproximadamente normal à tendência estrutural dominante NE-S W. Entretanto, os dados SPOT mostraram as mesmas feições, a despeito das condições de iluminação menos favoráveis. No caso do MSS, o número maior de classes medidas, bem como a menor extensão acumulada, provavelmente estejam relacionados às condições de menor resolução espacial e iluminação solar desfavorável. No caso do TM, os melhores canais na fotointerpretação foram 3, 5 e 7, devido a seus maiores contrastes radiométricos e principalmente ao fato de grande parte da informação estrutural estar vinculada a lineações tonais. Com o SPOT pancromático, geralmente estas mesmas informações são extraídas com maior confiança dos pares estereoscópicos, porém com maior consumo de tempo. Desta forma, constatou-se para o mapeamento das es-

tinturas, na região, uma quase equivalência entre a maior resolução espacial do SPOT pancromático com a melhor resolução espectral do TM-LANDSAT.

Contexto Geológico de Detalhe ANÁLISE DO ATRIBUTO ESPACIAL Esta fase de análise do atributo espacial foi desenvolvida em escala de maior detalhe (1:100.000 para o SPOT pancromático e 1:70.000 para fotos aéreas pancromáticas). Os pares estereoscópicos foram analisados em estereoscópio de espelho usando para ampliação um sistema de lentes (telescópio com fator de ampliação = 3).

A interpretação foi baseada no exame de elementos de drenagem e relevo por meio de análise morfoestrutural (Bashenina *et al.* 1972, Guy 1966, Riverau 1970, Soares & Fiori 1976). Basicamente, o processo incluiu um exame detalhado da influência dos processos endógenos (tectônicos) e exógenos (climáticos) na estruturação das formas do relevo. Como consequência, tornou-se possível definir os elementos de fotointerpretação que foram usados no processo de análise: 1. alinhamentos negativos e positivos (lineamentos estruturais); 2. quebras positivas e negativas (limites litológicos e erosivos); 3. feições lineares positivas e negativas (traços de acama-

mento, foliações e fraturas); 4. limites de zonas fotogeológicas; 5. propriedades de zonas fotogeológicas; e 6. elementos indicativos de estruturas geológicas (mergulhos, falhas e fraturas).

A partir deste conjunto de informações, foi possível definir unidades fotogeológicas e caracterizá-las por suas propriedades (índices de fotointerpretação): 1. fator de anisotropia (propriedade de um corpo rochoso se orientar em uma direção preferencial); 2. simetria de relevo (posicionamento espacial do corpo rochoso); 3. resistência à erosão (forma de encosta); 4. grau de ruptura (densidade de fraturamento); 5. densidade textural fotográfica (variações em gradações de preto e branco, indicativas do grau de homogeneidade em composição litológica/mineralógica). A partir desta análise, foi possível estabelecer a distribuição espacial das principais unidades litológicas no módulo B da figura 3 e avaliar a comparação entre dados pancromáticos SPOT e fotos aéreas em visão estereoscópica (Fig. 6).

Fundamentando-se nesses dados, não se percebe diferença significativa no conteúdo da informação geológica. Em ambos os mapas, porém, algumas diferenças sutis foram notadas nas variações em índices de fotointerpretação usados para a mesma unidade mapeada. Tais variações estariam provavelmente ligadas ao menor exagero vertical e pela melhor visão sinóptica nas imagens SPOT e por maiores distorções de bordas nas fotos aéreas. A visão sinóptica implica melhor caracterização da continuidade espacial das unidades e, conseqüentemente, traçado mais preciso dos contatos. O menor exagero vertical do SPOT facilita a definição de acamamentos subverticais, mas em contrapartida dificulta a caracterização da resistência à erosão e do nível de fraturamento das unidades, quando comparadas às fotos aéreas.

Quando a figura 6 é comparada com a figura 2, pode-se observar que existe um maior detalhamento geológico nos mapas fotointerpretados da figura 6. A maior contribuição geológica nesta figura está na detecção de subunidades na unidade gnáissica (biotita gnaisse/quartzo-feldspato gnaisse), mantida como uma unidade no mapa da figura 2 e indicadas pelas letras c, d e e no perfil a-g da figura 6a. A confirmação das características litológicas destas subunidades carece de estudos adicionais em campo.

ANÁLISE DO ATRIBUTO ESPECTRAL Efeito da Visada Obliqua A visada para oeste, ao longo do plano solar, como no presente caso dos dados multiespectrais do SPOT, representa a pior configuração possível de efeitos de retroespalhamento atmosférico, os quais diminuem o contraste da imagem, quando comparados com a visada próxima ao *nadir* dos dados TM. Em sistemas sensores com visadas oblíquas, a radiancia mudará drasticamente em imagens sucessivas quando obtidas sob diferentes configurações, sol-alvo-sensor. A fim de analisar este efeito, foi realizada uma comparação direta de dados multiespectrais SPOT e TM. Os valores digitais de imagens de áreas comuns selecionadas e representativas em sua maioria de unidades litológicas, do bloco ocidental do módulo C da figura 3, foram parcialmente normalizados pelo uso de técnicas de transformações radiométricas sugeridas por Markhan & Barker (1986).

Nessas técnicas, busca-se uma normalização dos dados por meio da transformação dos valores digitais registrados pelo sistema sensor em valores físicos relacionados à reflectância dos alvos imageados. Este processo normalmente é realizado em duas etapas: na primeira, consideram-se as transformações relacionadas às especificações técnicas do sistema sensor, na segunda, levam-se em consideração as variáveis relacionadas às condições ambientais durante a coleta de dados.

Para a primeira etapa, a radiancia total L_t , que atinge o sensor no topo da atmosfera, é dada por:

$$L_t = \frac{VD}{VD_{max}} (L_{max} - L_{min}) + L_{min}$$

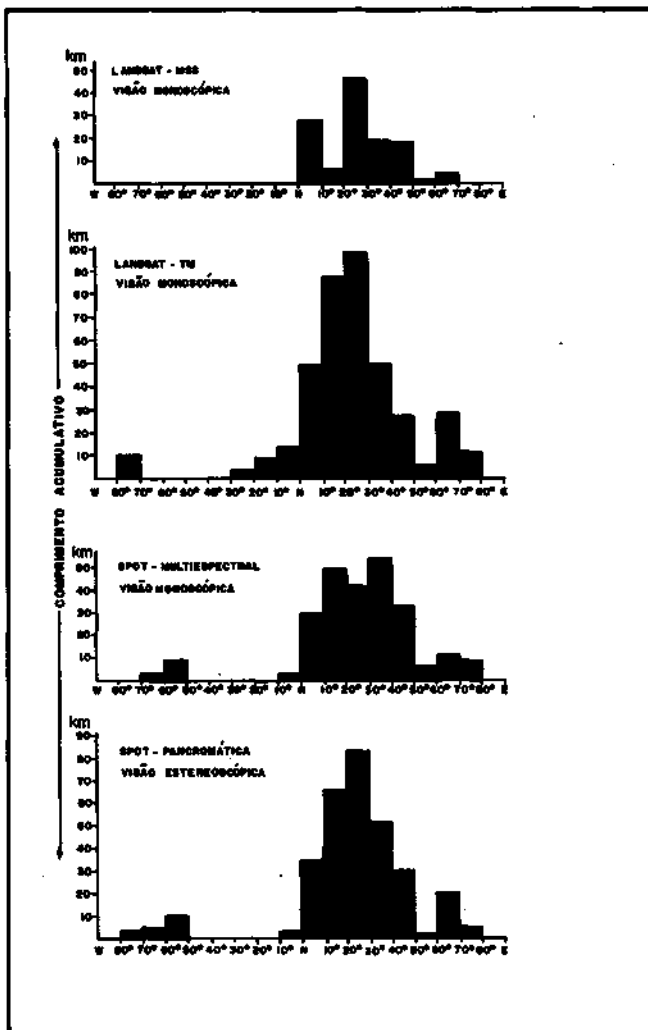


Figura 5 — Valores acumulados (comprimento em km) para feições lineares extraídas visualmente das imagens (MSS e TM-LANDSAT e SPOT, módulos pancromático e multiespectral) Figure 5 - Cumulative length of the direction of linear features extracted from MSS, TM and SPOT multiespectral and SPOT panchromatic paper products

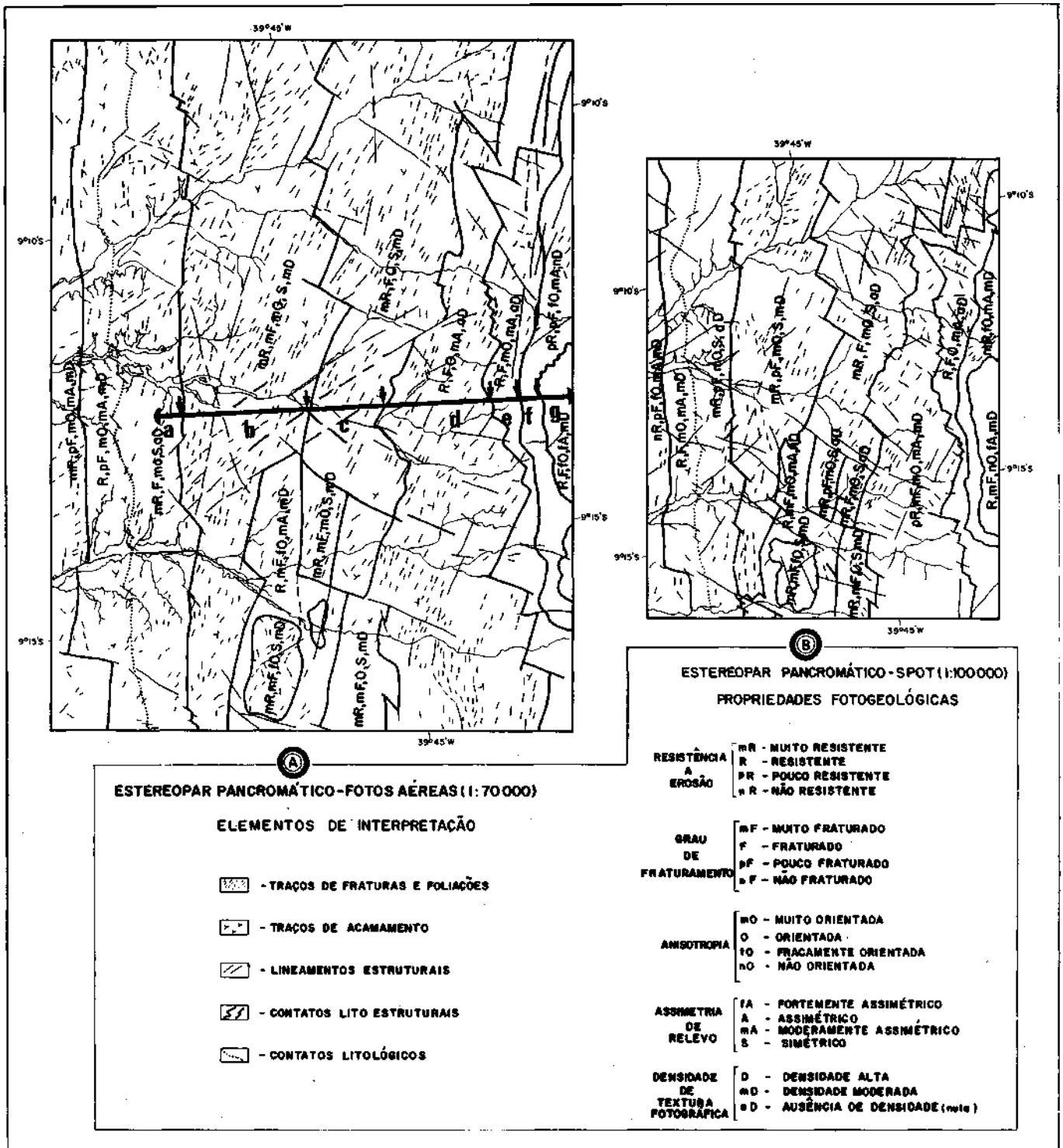


Figura 6 - Mapas fotointerpretados a partir de dados pancromáticos: A. fotos aéreas (escala 1:70.000); e B. imagens SPOT (escala 1:100.000, visão estereoscópica). A linha contínua (a para g) corresponde à localização geográfica de um perfil radiométrico discutido no texto

Figure 6 - Photointerpreted maps from (A) airphotos (1:70.000) and (B) SPOT (1:100.000) panchromatic stereo pairs. The solid line (a to g) is the geographic position of a radiometric transect discussed in the text

sendo que para determinada faixa espectral A de cada banda do sistema sensor têm-se:
 VD = valor digital do "pixel";
 VD_{max} = maior valor digital possível, dado pelo intervalo dinâmico de gradações de cinza (no caso do TM e SPOT = 255);

L_{max} = radiância de saturação do detector;
 L_{min} = menor radiância que sensibiliza o detector.
 A segunda etapa da transformação leva em consideração as diferentes condições ambientais relativas à transparência atmosférica e condições de iluminação solar. Como primeira aproximação, assume-se uma atmosfera perfeitamente trans-

parente, que não tenha o componente aditivo de radiação atmosférica e que a superfície seja horizontal, plana e lambertiana, iluminada somente pela irradiância direta do sol, sem o componente difuso. A seguinte equação expressa esta aproximação para cada valor de irradiância direta $E(\lambda X)$ no topo da atmosfera, para o intervalo espectral de cada banda e para determinado ângulo zenital solar Θ_z :

$$R(\Delta\lambda) = L_r(\Delta\lambda) \frac{\pi}{E(\Delta\lambda)\cos\Theta_z}$$

Desta maneira, estima-se a reflectância aparente $R(\Delta\lambda)$ considerando-se negligível a interferência atmosférica, a atitude das encostas, a contribuição das áreas adjacentes e a reflectância anisotrópica do alvo. Os parâmetros de resposta requeridos para os detetores dos sistemas sensores TM do LANDSAT e HRV do SPOT foram obtidos de Markhan & Barker (1986) e Courtois (1983) respectivamente. Os valores resultantes para a "reflectância aparente" de várias unidades litológicas são vistos na figura 7a para o TM e na figura 7c para o SPOT.

Neste caso, deve ser ressaltado que outros fatores associados com mudanças na geometria iluminação-alvo-sensor não foram levados em consideração, tais como a transmissão atmosférica espectral, a radiância de trajetória, a irradiância solar sobre o alvo, o fator de reflectância bidirecional da superfície e variações topográficas. Contudo, os valores de "reflectância aparente" obtidos estão dentro de intervalos razoáveis, como pode ser visto na figura 7b, para a água, vegetação verde e pavimentos com esparsa cobertura de caatinga, representativos de unidades litológicas. Tais valores de "reflectância aparente" estão também de acordo com os valores de reflectância de campo obtidos para estes mesmos locais, por Paradella (1986a). A comparação entre os valores obtidos de áreas comuns para imagens SPOT com visada para oeste e TM próxima ao nadir (Fig. 7d) mostra diferenças que podem ser atribuídas principalmente ao efeito da maior interferência atmosférica na configuração de tomada de dados via SPOT. Na figura 7d, a diferença em "reflectância" entre o SPOT e o TM é maior para os comprimentos de onda mais curtos e decresce em direção ao infravermelho próximo, como seria esperado neste caso. A análise de diferenças de "reflectância" normalizada indica menor contraste espectral nos dados SPOT que nos do TM e também a possibilidade de comportamento espectral anisotrópico de alguns alvos, ou mudanças na radiação das cenas devido às diferentes épocas de imageamento.

Discriminação de Unidades Litológicas No intuito de avaliar o desempenho de dados multispectrais SPOT e TM na discriminação de litologias, são analisadas na figura 8 as distribuições de valores de média e um desvio-padrão dos números digitais de sete classes de rochas do bloco ocidental do módulo C da figura 3.

Fundamentado nestas distribuições, o desempenho dos canais comuns SPOT e TM (isto é, SPOT XS 1, 2 e 3 e TM 2, 3, e 4) é muito similar, com um desempenho ligeiramente superior no canal XS1 em relação ao TM2, XS2 em relação ao TM3 e do TM4 em relação ao XS3. Quando são considerados todos os canais de ambos conjuntos, os dados TM excluem apenas um conjunto na discriminação (b não se discrimina de e), enquanto que para os dados SPOT, quatro conjuntos não são discrimináveis (a-f, b-d, b-e, d-e).

A análise visual de imagens realçadas por computador (Prancha 1) indica, de modo geral, concordância com estes resultados, exceto que algumas classes que apresentam sobreposições nos desvios-padrões da figura 8 podem ser visualmente discriminadas devido à contribuição do atributo espacial, tal como ocorre com o dique de gabro (classe gabro, ponto "a" na Prancha 1), ou devido à habilidade do olho humano em perceber diferenças tonais sutis quando a cena é

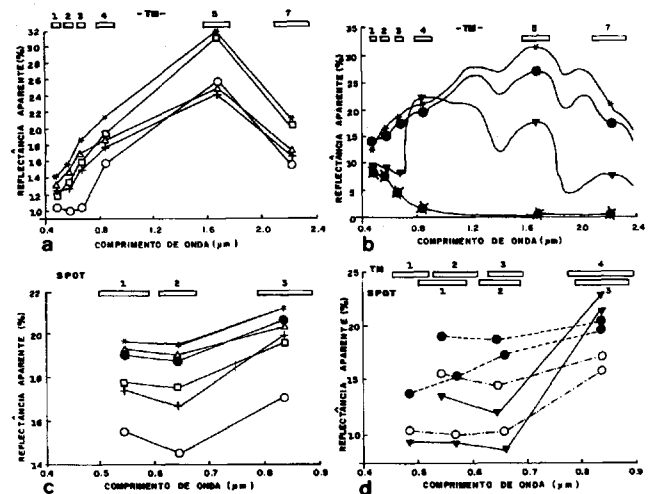


Figura 7 - Valores de "reflectância aparente" para dados do TM-LANDSAT e SPOT multispectral de áreas comuns (Legenda: + = anfíbolitos; Δ = gabro; * = migmatitos; ▣ = hiperstênio gnaisses; □ = mármore e calcários; ○ = xistos; ▣ = água; ▽ = vegetação)

Figure 7 - Multispectral LANDSAT TM and SPOT derived "apparent reflectance" from common sites. (Legend: + = amphibolite; Δ = gabbro; * = migmatite; ▣ = hypersthene gneiss; □ = marble/limestone; ○ = schist; ▣ = water; ▽ = vegetation)

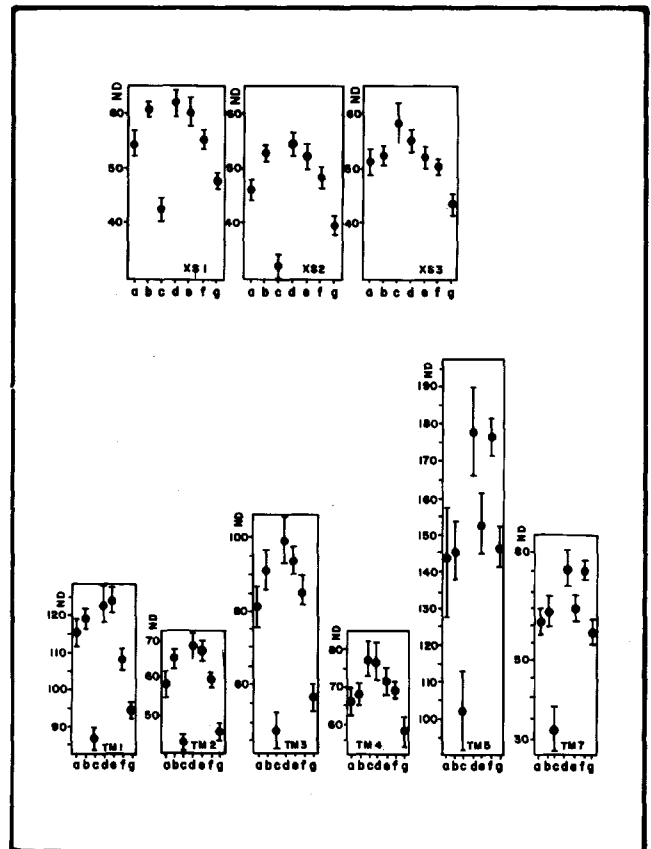


Figura 8 - Valores digitais do SPOT e TM para as classes de litologias e de vegetação verde. São apresentadas as médias e barras para um desvio padrão (Legenda: a = anfíbolitos; b = gabro; c = vegetação verde; d = migmatito; e = hiperstênio gnaisses; f = mármore; g = xistos)

Figure 8 - SPOT and TM digital values for lithologies and green vegetation. The mean and one standard deviation are also presented (Legend: a = amphibolite; b = gabbro; c = green vegetation; d = migmatite; e = hypersthene gneiss; f = marble; g = schists)

vista sinopticamente. Outra razão aventada seria o esquema de amostragem dos valores digitais, que provavelmente não foi capaz de representar o intervalo total de variações radiométricas dentro de cada unidade.

Ainda dentro dessa discussão, a unidade migmatito pode ser discriminada da unidade biotita-hiperstênio gnaisse em ambas as composições coloridas SPOT e TM, Prancha 1a e b). A razão para isto é que alguns solos e produtos de alteração de rochas na área-teste contêm argilo-minerais ricos em Fe e hidroxilas (montmorilonita), os quais causam feições de absorção na parte do infravermelho próximo e médio, em Contraste com a resposta mais alta associada às outras unidades litológicas, que são menos argilosas (Paradella 1986a), como demonstram os gráficos da figura 7. Também as diferenças em precipitações que precederam as passagens TM e SPOT, com grande probabilidade, contribuíram para aumentar o contraste entre unidades argilosas e não-argilosas nas imagens TM. Em termos de informações relacionadas espacialmente, os produtos SPOT processados em computadores conseguiram mostrar mais detalhes (Prancha 1c).

Quando se examina o bloco oriental do módulo C (Fig. 3), de geologia e estrutura mais complexa, a discriminação litológica torna-se difícil pela análise espectral, exceto na clara discriminação entre a unidade biotita-hiperstênio gnaisse e a unidade migmatítica a oeste e a unidade gnáissica a leste, vista na composição colorida TM-LANDSAT, formada pelos canais do infravermelho próximo (TM 4,5,7, Prancha 2b).

Em complemento ao que foi discutido anteriormente em relação ao poder de discriminação dos atributos espaciais dos dados pancromáticos do SPOT (Fig. 6) e para confirmar a separação das novas subunidades ali mapeadas, um perfil radiométrico leste-oeste foi extraído, contendo as principais unidades litológicas da área. Na figura 9 são mostradas as variações em valores digitais ao longo da Unha a-g da figura 6. As unidades A, B, C, D, E, F e G, indicadas na figura 9 por linhas verticais para facilitar a correlação visual, correspondem às unidades a-g da figura 6. Um exame cuidadoso do perfil indica que as bandas TM 4, 5, 7 e a razão TM 5/2 são as que mostram maiores diferenças de valores digitais entre unidades adjacentes, ao passo que os dados multiespectrais do SPOT mostram as menores variações. As razões para este fato foram abordadas anteriormente, incluindo a posição dos canais no infravermelho médio do TM, sensíveis a presença de minerais com água e hidroxila e à maior precipitação precedendo a passagem do TM. Tais resultados reforçam a importância da análise espacial dos dados pancromáticos do SPOT na definição de subunidades não definidas em trabalhos prévios.

Integração de Produtos Produtos combinados foram também gerados pelo uso de Transformações IHS (Haydn *et al.* 1982, Dutra *et al.* 1988). Neste tipo de realce, uma composição colorida RGB (três bandas associadas a cores primárias, isto é, vermelho, verde e azul) é transformada em componentes perceptivos de intensidade (I), matiz (hue = H) e saturação (S), por meio de modelos de percepção visual. Em tais modelos, a percepção de resolução espacial pelo olho humano é maior para a componente I e decresce segundo as componentes H e S, respectivamente. Essa característica foi explorada no trabalho em que se procurou combinar para o módulo D (Fig. 3) a vantagem da elevada resolução espacial da banda pancromática do SPOT (Prancha 3a) com as bandas de moderada resolução espectral do infravermelho, presentes no TM-LANDSAT 5 (TM 4, 5 e 7). Tais bandas foram escolhidas por mostrarem bons efeitos em termos de composição colorida.

Do ponto de vista de processamento de imagens, a análise foi desenvolvida em sete fases: 1. co-registro dos dados TM-LANDSAT e SPOT através do polinômio de primeira ordem (Transformação Afim Geral), usando pontos comuns de localização nos dois produtos sensores; 2. reamostragem dos ca-

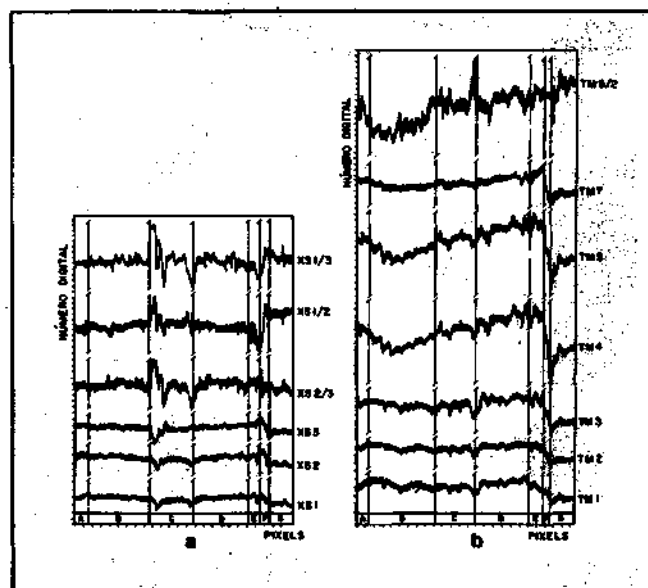


Figura 9 - Valores digitais correspondentes aos dados multiespectrais SPOT e TM (canais originais e divisões de canais) referentes ao "perfil radiométrico" a-g da figura 6
Figure 9 - Digital values from SPOT(a) and TM(b) in "radiometric" cross section seen on figure 6, from a to g

nais multiespectrais do TM-LANDSAT 5 com 20 m de resolução espacial para "pixels" de 10 m de resolução espacial, com base em algoritmo de vizinho mais próximo; 3. aplicação de filtragem digital passa-baixa para suavizar os efeitos de borda nos "pixels" nas imagens ampliadas (*smoothing*); 4. equalização dos valores da média dos níveis de cinza nas bandas TM, evitando assim efeitos de polarização de H na fase posterior de transformação IHS; 5. aplicação de transformação RGB para IHS nos canais TM 4,5,7, segundo modelo de Haydn *et al.* (1982); 6. substituição do canal correspondente à intensidade (I) pela banda pancromática do SPOT (Prancha 3A), ao passo que H foi mantido invariável e ao canal saturação (S) foi adicionado um "offset" de 50 valores digitais por "pixel" a fim de facilitar o realce de cores (as cores tornam-se mais vivas); 7. aplicação da transformação inversa IHS para RGB, com observação do resultado em um monitor colorido (Prancha 4a).

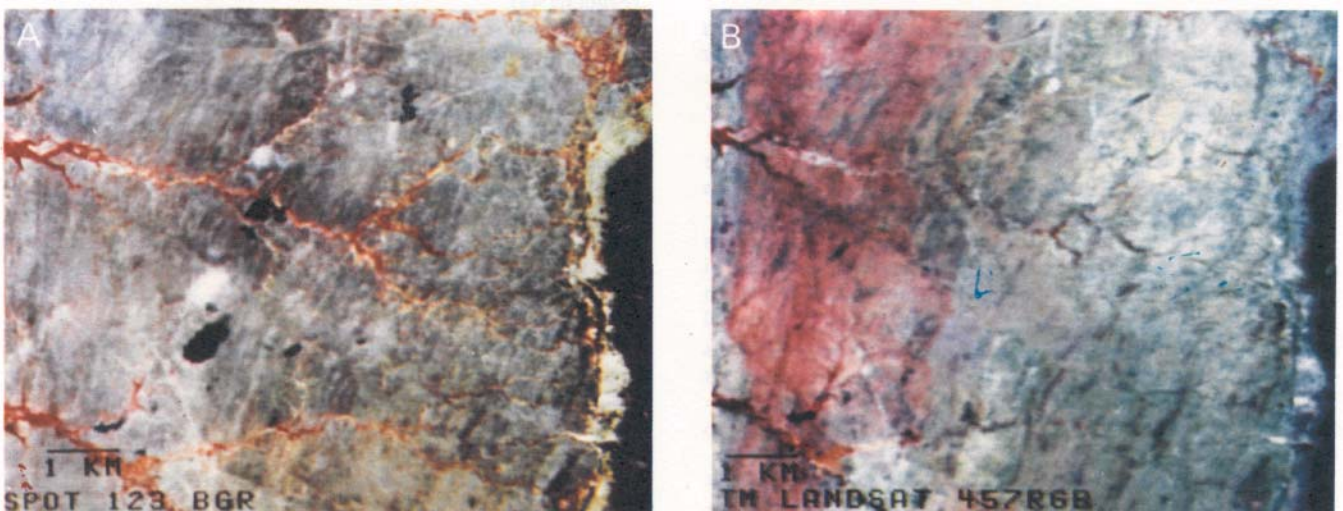
Uma análise visual desse realce foi feita em relação aos dados prévios disponíveis (Prancha 4b) e confirmou que a técnica de integração dos diferentes produtos sensores é bastante superior às composições coloridas anteriores. As características de excelente resolução espacial do SPOT permitiram a detecção dos detalhes na composição colorida (estradas, caminhos, drenagem, traços de fratura e foliação etc.), ao mesmo tempo que a posição no espectro eletromagnético das bandas 4, 5 e 7 do TM-LANDSAT favorece o contraste de respostas espectrais entre os diferentes produtos de alteração de rochas e, solos na área enfocada.

CONCLUSÕES À luz das condições da área teste (geologia, geomorfologia, vegetação e solo, componentes atmosféricos, datas de aquisição distintas e diferentes configurações na geometria sensor-alvo-iluminação), a discriminação litológica é otimizada quando a análise está baseada nos atributos espaciais do SPOT pancromático (em visão estereoscópica) e aos espectrais do TM-LANDSAT (bandas do infravermelho refletido). Nesse caso, a extração da informação espectral é facilitada pelo uso de sistemas de tratamento digital, que são onerosos. Por outro lado, a extração da informação espacial



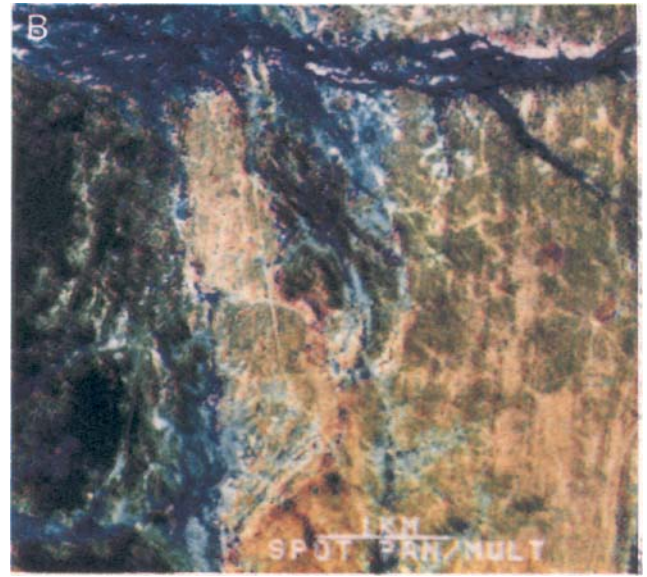
Prancha 1 - Composições coloridas de imagens do bloco ocidental, módulo C: a. SPOT XS 1, 2, 3, cores azul, verde e vermelho, respectivamente; b. TM 3, 4, 5, azul, verde e vermelho, respectivamente; c. SPOT XS 1, 2, 3, processamento IHS; d. Componente Principal do TM 1, 2, 3, 4, 5, e 7: 1ª- CP, 2ª CP e 3ª CP com cores verde, vermelho e azul respectivamente

Plate 1 - Color composites, western block, module C: a. SPOT XS1, XS2, XS3-BGR; b. LANDSAT TM 3,4,5 - BGR; c. IHS processed SPOT XS1, XS2, XS3; d. LANDSAT Principal Components from TM1, 2, 3,4,5 and 7 - PC1, PC2, PC3-GRB

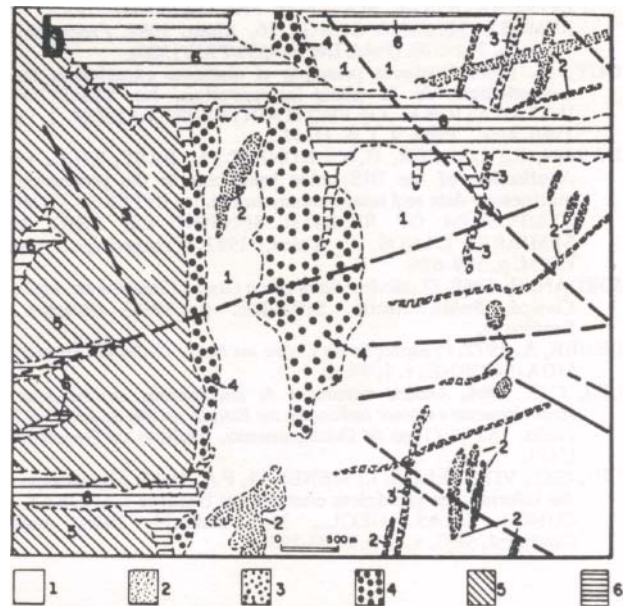
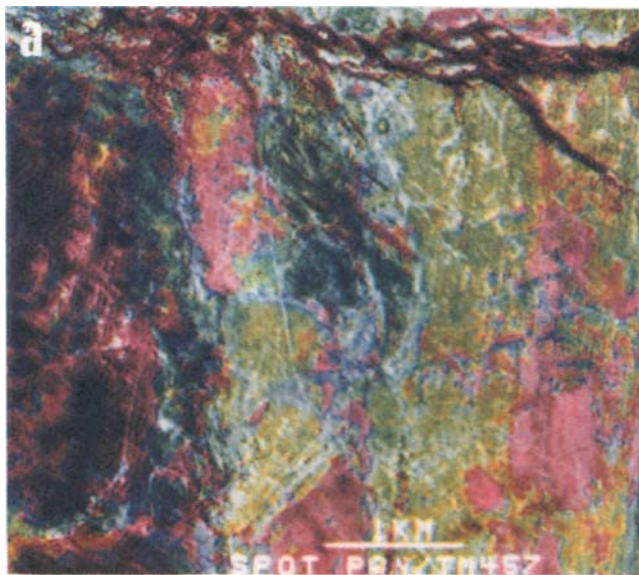


Prancha 2 - Composições coloridas do bloco oriental, módulo C: a. Spot XS 1, 2, 3, - cores azul, verde e vermelho, respectivamente; b. TM-LANDSAT 4, 5, e 7 - cores azul, verde e vermelho, respectivamente

Plate 2 - Color composites, eastern block, module C: a. SPOT XS1, XS2, XS3 - BRG; b. LANDSAT TM 4, 5, 7 - BGR



Prancha 3 — Módulo D: **A.** pancromático do SPOT, visada para oeste; **B.** imagem colorida que combina os canais multiespectrais e pancromático do SPOT obtida pela transformação IHS
 Prancha 3 - Module D: **A.** SPOT panchromatic, west look; **B.** THS processed SPOT multispectral and panchromatic bands, west look



Prancha 4 - a. Combinação colorida obtida pela transformação IHS de imagem pancromática SPOT (canal 1) e TM 4, 5, 7 (canais H e S), Módulo D; b. distribuição das unidades litológicas na área correspondente às Pranchas 3 e 4a (Legenda: 1 = gnaisses; 2 = máficas e ultramáficas; 3 = cálcio-silicáticas; 4 = mármore; 5 = xistos; 6 = aluviões. FONTE: Delgado & Souza 1975)

Plate 4 - Module D: a. IHS processed SPOT panchromatic and TM 4,5,7 bands; b. lithological units for comparison with the photos of 3 and 4a. Legend: 1. gneiss; 2. mafic-ultramafic rocks; 3. calc-silicates; 4. marbles; 5. schists; 6. alluvium (Source: Delgado & Souza 1975)

via SPOT requer especialização na extração de informação geológica e, problema ainda maior, a obtenção de duas passagens em ângulos de visada opostos. Estas duas passagens devem ser obtidas em condições atmosféricas favoráveis e preferencialmente em condições similares de pluviosidade no período antecedente (2 a 3 meses), fatores estes extremamente limitantes. Portanto, em casos nos quais parte da informação de interesse está relacionada ao atributo espacial e a outra ao atributo espectral, a combinação digital de produtos pode facilitar a fotointerpretação, desde que tais produtos possam reter as qualidades de alta resolução espacial (SPOT-pancromático) e de moderada resolução espectral, principalmente no infravermelho (bandas 5 e 7 do TM-LANDSAT).

Neste trabalho, a degradação radiométrica dos dados SPOT, devido à visão oblíqua, não comprometeu a extração da informação litológica, mesmo notando-se que as imagens SPOT apresentavam menores contrastes radiométricos, principalmente nos canais de comprimento de ondas mais curtos, quando comparadas com canais similares do TM-LANDSAT.

Por último, no que se refere ao mapeamento regional usando imagens em papel, a análise visual mostrou que o desempenho do MSS-LANDSAT foi inferior ao do TM e SPOT. Por outro lado, nem o SPOT nem o TM acrescentaram, do ponto de vista regional, informações ao conhecimento geológico prévio da área, obtido a partir de produtos MSS realçados por técnicas de tratamento digital.

Agradecimentos Os autores expressam seus agradecimentos ao Corpo Consultivo da RBG pelas sugestões e a Maria do Carmo Silva Soares do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela revisão de linguagem do texto.

Os autores também expressam seus agradecimentos à SPOT-IMAGE e à sua representação no INPE por viabilizar a publicação em cores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA FILHO, R. 1984. *Sensoriamento remoto orbital aplicado, à prospecção mineral em corpos granfíticos das províncias estaníferas de Goiás e de Rondônia: uma contribuição metodológica.*, São Paulo. 158p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências USP).
- AMARAL, G.; MATTOS, J.T.; ALMEIDA FILHO, R.; CUNHA, R.P.; PARADELLA, W.R. 1976. Carta Geológica ao milionésimo da folha Belo Horizonte com base na interpretação de imagens LANDSAT. In: CONGR. BRAS. GEOL., 29, Ouro Preto, 1976. *Anais...* Ouro Preto, SBG, v.4, p. 229-238.
- BASHENINA, N.V.; ARISTARKHOVA, L.V.; LUKASHOV, A.A. 1972. Methods of morphostructural analysis in geomorphological mapping. In: DEMEK, J. ed.. *Manual of detailed geomorphological mapping*. Prague Academia, p. 83-101.
- COURTOIS, M. 1983. Spot System Conception and Program Status. In: ANNUAL W.T. PECORA SYMPOSIUM, 8, Sioux, 1983. *Proceedings...* Sioux, p. 269-278.
- DELGADO, I.M. & SOUZA, J.D. 1975. *Projeto Cobre, Curaçá; Relatório Final; Geologia Econômica do Distrito Cuprífero do Rio-Curaçá, Bahia, Brasa*. Salvador, Convênio DNP/CPRM, 30v.
- DUTRA, L.V.; MENESES, P.R.; PARADELLA, W.R. 1988. Color enhancement of remote Sensing Imagery using IHS transformation and Decorrelation Stretch methods. In: INTERNATIONAL SOC. FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONG., 16, Kioto, 1988. *Proceedings...* Kioto, p. 312-320. (Publ. INPE-4559/PRE/1300).
- GUY, M. 1966. Quelques principes et quelques experiences sur la methodology de la photo-interpretation. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL OF PHOTO-INTERPRETATION, 2, Paris, 1966. *Acte...* Paris, v. 1, p. 21-41.
- HAYDN, R.; DALKER, G.W.; HUNKEL, J.; BASE, J.H.E. 1982. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF REMOTE SENSING OF ARID AND SEMIARID LANDS, 2, Cairo, 1982. *Proceedings...* Cairo, ERIM, p. 599-616.
- JORDAN, H. 1968. *O calcário Bambuí o Grupo Canudos na região de Curaçá, Bahia*. Recife, SUDENE, p. 59-63 (Boletim de Estudos 4).
- LEUBE, A. 1972. *Prospecção de Cobre no Norte da Bahia*. Hannover, MGA-SUDENE. v. 1, 98 p.
- LIU, C.C. 1984. *Análise estrutural de Uneamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao Estado do Rio de Janeiro*. São Paulo. 157 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP).
- LIU, C.C.; VITTORELLO, I.; MENESES, P.R. 1980. Alguns aspectos das informações geológicas contidas em Imagens LANDSAT. In: CONGR. BRAS. GEOL., 31, Camboritif, 1980. *Anais...* Camborid, SBG, v. 5, p. 2929-2936.
- MARKHAN, B.L. & BARKER, J.L. 1986. Landsat MSS and TM postcalibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. In: *Eosat Landsat Tech. Notes*. 1:3-7.
- MATTOS, J.T. 1986. *Caracterização do comportamento geológico-estrutural na região da represa de Furnas (MG) com dados de sensoriamento remoto*. São Paulo. 181 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP).
- MENESES, P.R. 1986. *Avaliação e seleção de bandas do sensor "Thematic Mapper" do LANDSAT-5 para a discriminação de rochas Carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio do mapeamento de sentí-detaOies*. São Paulo. 233 p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP).
- PARADELLA, W.R. 1986a. O significado litológico da informação espectral e temporal (sazonal) de dados digitais MSS do satélite LANDSAT 3 para o Baixo do Rio Curaçá, Bahia. *Rev. Bras. Geoc.*, 16(2):135-148.
- PARADELLA, W.R. 1986b. Avaliação preliminar de dados TM LANDSAT para exploração mineral na região Amazônica: intrusivas de Maracaná e Maicuru (Pará). In: CONGR. BRAS. GEOL., 34, Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia, SBG, v.6, p. 2951-2954.
- PARADELLA, W.R.; ALMEIDA FILHO, R. 1976. Condicionamento das Mineralizações Radioativas no Planalto de Poços de Caldas. In: CONGR. BRAS. GEOL., 29, Ouro Preto, 1976. *Anais...* Ouro Preto, SBG, v. 2, p. 181-190.
- RIVERAU, J.C. 1970. *Curso de fotointerpretação*. Brasília, Universidade de Brasília. 128 p. (Série Didática 4).
- SOARES, P.C. & FIORI, A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em Geologia. *Notícias Geomorfológicas*, 16(32):71-104.
- SOARES, P.C.; BARCELOS, S.M.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; MENESES, P.R. 1982. Lineamentos em imagens de LANDSAT e de radar e suas implicações no conhecimento da bacia do Paraná. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2, Brasília, 1982. *Anais...* Brasília, INPE, v. 2, p. 143-156.
- VITTORELLO, I. & PARADELLA, W.R. 1984. Lithological discrimination by digital processing: a case study in Sena do Ramalho, Bahia. In: INTERNATIONAL SOC. FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGR. Rio de Janeiro, 1984. *Annals...* Rio de Janeiro, v. 25, T. A8, p. 560-571.

MANUSCRITO A637
Recebido em 01 de fevereiro de 1990
Revisão do autor em 03 de agosto de 1990
Revisão aceita em 07 de agosto de 1990