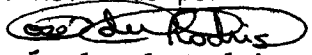
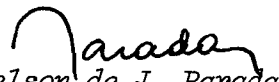



1. Classificação INPE-COM.4/PE C.D.U.: 621.38SR:553.494(813.4)		2. Período	4. Distribuição
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) ILMENITA TITANIO PESQUISA MINERAL LANDSAT CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA			interna <input type="checkbox"/> externa <input checked="" type="checkbox"/>
5. Relatório nº INPE-1415-RPE/003	6. Data Janeiro, 1979	7. Revisado por  José Eduardo Rodrigues	
8. Título e Sub-Título USO DA CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS DO SATÉLITE LANDSAT NA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE ILMENITA PRIMÁRIA EM FLORESTA, PERNAMBUCO		9. Autorizado por  Nelson de J. Parada Diretor	
10. Setor DSR/GMI	Código	11. Nº de cópias 22	
12. Autoria Sylvio de Queirões Mattoso* Waldir Renato Paradella Paulo Roberto Meneses		14. Nº de páginas 34	
13. Assinatura Responsável 		15. Preço	
16. Sumário/Notas  <i>Foi conduzido um programa de classificações automáticas de dados do LANDSAT no analisador I-100 do Instituto de Pesquisas Espaciais, visando a definição de áreas de ocorrência de ilmenita primária na região de Floresta, Pernambuco. Os dados do LANDSAT foram analisados e definidos os padrões de classificações automáticas para ilmenita primária a partir de uma jazida na fazenda Exú, município de Floresta, Pernambuco. Os parâmetros obtidos permitiram, através de classificações automáticas com o uso do Programa "Max Ver", individualizar várias áreas como potencialmente favoráveis à ocorrência de ilmenita. Os resultados preliminares de campo, comprovaram a confiabilidade das classificações realizadas, apresentando elevada eficiência na definição de áreas com concentrações de ilmenita primária. O estudo fez parte de um contrato de prestação de serviço estabelecido entre o INPE e a Construtora Norberto Odebrecht S.A.</i>			
17. Observações * Construtora Norberto Odebrecht - Salvador, BA.  <i>Este trabalho foi apresentado no II Seminário Brasileiro sobre Técnicas Exploratórias em geologia - Fev/1979, Gravatal, Santa Catarina.</i>			

## ÍNDICE

ABSTRACT .....	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>v</i>
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL .....	2
3. GEOQUÍMICA .....	6
3.1 - Fatores de decisão da aplicação da classificação automática de dados do satélite LANDSAT .....	7
4. O SISTEMA I-100 E O PROGRAMA "MAX VER" .....	9
4.1 - Considerações gerais .....	9
4.2 - O analisador image-100 (I-100) .....	9
4.3 - O programa "MAX VER" .....	11
5. METODOLOGIA: ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	13
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	19
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	25
AGRADECIMENTOS .....	27
BIBLIOGRAFIA .....	28

ABSTRACT

A program of thematic automatic extraction of LANDSAT data, based on the maximum likelihood criterion was realized at INPE, in mineral research of titanium deposits. The classification was carried out within almost 500 km<sup>2</sup> and the known ore - titanium deposits of the fazenda Exú, in the Pernambuco state, was chosen as a test-area. The classification results pointed out 600 alarm areas of high potentiality of titanium occurrence. Almost 80 of these 600 alarm areas were checked by field work and in 56 of these alarm areas titanium occurrences were confirmed and 4 new ore-deposits were discovered. In a detailed description of the methodology is presented in this report.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 - Esboço geológico regional, obtido a partir de imagens do LANDSAT, mostrando no extremo oriental a área da pesquisa, com a localização da jazida da fazenda EXU.	6
Fig. 2 - Fluxograma básico das etapas do trabalho .....	18
Fig. 3 - Canal 7 do LANDSAT mostrando áreas de amostragens para as classes consideradas .....	19
Fig. 4 - Mapa temático final mostrando áreas alarmadas para ilmenita .....	20
Fig. 5 - Mapa temático final superposto ao canal 7 realçado ..	20
Fig. 6 - Curvas de reflectância espectral para rochas (solos) ricas em ferro e pobres em ferro. O maior contraste está situado nas regiões do vermelho-infravermelho próximo (canais 7 e 6 do LANDSAT). .....	24

## 1 - INTRODUÇÃO

Em dezembro de 1976, amostras de ilmenita primária, procedentes do Serrote das Pedras Pretas, em Floresta, Pernambuco, foram encaminhadas à INORCAL, uma empresa da Organização Odebrecht, que logo manifestou seu interesse pelo assunto. O País importava ilmenita a fim de satisfazer a mais de 80 por cento de suas necessidades. Embora o volume dessa importação tenha pouca expressão, considerado o volume global das importações brasileiras, a produção local viria atender ao programa nacional de substituição das importações.

As informações geológicas disponíveis no início eram insuficientes para avaliar o potencial da área. Disponha-se de um mapa geológico na escala 1:250.000, resultado de reconhecimento fotográfico, que sugeria uma província granítica ao norte da cidade de Floresta, na área de ocorrência da ilmenita.

A Organização Odebrecht, acostumada a operar com prazos curtos para retorno dos seus investimentos, iria lançar-se na prospecção mineral, que tem como riscos os imponderáveis da geologia e cujos resultados costumam aparecer em prazos dilatados, pouco usuais nos meios empresariais brasileiros.

Os primeiros trabalhos na área da ocorrência apontavam para uma jazida de ilmenita maciça, de alto teor. Se essa primeira impressão se confirmasse, o minério após pouco ou nenhum beneficiamento, poderia ser usado com êxito pela indústria (pigmentos).

Era necessário esclarecer se a ilmenita maciça seria produto de enriquecimento secundário (concentração como resultado da lixiviação dos silicatos durante o intemperismo) ou se representaria um produto de segregação magmática.

O DNPM, por seu Centro de Geofísica Aplicada - CGA, realizou um levantamento magnetométrico, na área sub-aflorante da jazida

que sugeria faixas paralelas de intensidade magnética fraca e forte, se alternando. Poderiam tratar-se de faixas de ilmenita intercaladas com faixas de silicatos sem minerais magnéticos; ou faixas de ilmenita alternando-se com faixas de magnetita; ou faixas de ilmenita mais ricas em magnetita intercaladas com faixas de ilmenita empobrecidas em magnetita.

Foi realizado um programa de abertura de poços e trincheiras que mostravam a existência de lentes de ilmenita maciça, ocupando cerca de 7 por cento da área, imersas em uma matriz anfibolítica com ilmenita disseminada. As trincheiras revelaram uma distribuição de ilmenita muito semelhante à cromita bandada. As bandas de ilmenita apresentavam mergulhos entre 30° e 45° para o norte.

As primeiras sondagens, com recuperação de testemunho, revelaram um corpo com cerca de 30° de mergulho para o norte e as expectativas de continuidade em profundidade eram fortes.

Um reconhecimento regional revelou a existência de numerosas áreas com fragmentos de ilmenita e de vários afloramentos de orto-anfibolitos, meta-peridotitos e anortositos, todos favoráveis à idéia de uma província titanífera e quíça portadora de outros metais.

Com esses dados, firmou-se a intenção de acrescentar as reservas da jazida descoberta com jazidas adicionais. Sua execução dependeria de uma metodologia que permitisse resultados rápidos.

Durante o I Seminário Brasileiro sobre Técnicas Exploratórias em Geologia, em 1976, foi apresentado pelo INPE um trabalho que mostrou o potencial relacionado com o uso das imagens do LANDSAT em pesquisa mineral.

No campo, a jazida do Serrote das Pedras Pretas (Fazenda Exú) se caracterizava por um relevo topográfico positivo, que se eleva a quase 20m sobre a superfície geral. Além disso, a jazida tem a característica um conjunto de vegetação que se destaca da vegetação das áreas adjacentes e por um solo de cor vermelha e consistência argilosa,

bem distinto dos solos claros que se desenvolvem sobre os mica-xistos, anfibolitos, migmatitos e granitos da região. O solo da região da jazida de Pedras Pretas é coberto, em boa parte, por uma cascalheira quase contínua, formada por seixos de quartzo tingidos de preto e de vermelho (óxido de ferro e manganês) e fragmentos de ilmenita até a dimensão de matacão.

Nas fotografias aéreas pancromáticas, escala 1:25.000, a jazida de ilmenita da fazenda Exū, exibia caracteres tonais e texturais bem peculiares, que contrastavam com as características produzidas pelos outros tipos rochosos da região.

Porém, por ser extremamente difícil estabelecer estas correlações entre faixas adjacentes do levantamento aéreo, visto que a iluminação variava sensivelmente durante o período do voo e as fotografias apresentavam o efeito de "vignetting" (escurecimento das bordas), o uso isolado das fotos aéreas, embora promissor, tornava-se quase impraticável. Além disso, tal uso não reduzia a área de trabalho ou alvo, a dimensões onde se pudesse obter resultados confiáveis em prazos menores.

Ora, se a simples comparação visual, a partir das fotos aéreas, exibia a perspectiva de distinções entre rochas estêreis e mineralizadas, imaginou-se que uma classificação automática dos dados multi-espectrais do LANDSAT, no Analisador I-100, poderia melhorar em muito a confiabilidade na indicação de áreas potencialmente mineralizadas, com resultados sendo fornecidos em um prazo extremamente curto.

## 2 - ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL

A região da jazida de Exū está encravada na fatia cortada ao norte pela falha transcorrente de Patos e, ao sul, pela falha transcorrente de Pernambuco, que passa exatamente pela cidade de Floresta, 15 km ao sul da jazida da fazenda Exū.

Esse binário de forças deu origem a um S com numerosas fissuras de descompressão. Essas aberturas (fissuras) foram ocupadas

por granitos que frequentemente mostram estrutura gnáissica, e por pegmatitos formados quase exclusivamente de feldspato, um deles com 200 m de extensão e perto de 50 m de largura. Esses pegmatitos, quase monominerálicos, tanto podem ter sido injetados a partir dos granitos como, o que parece mais provável, podem ser o resultado da refusão do muscovita-xisto regional (Pierre Sabaté, UFBA, comunicação oral).

As relações de campo ainda estão pouco claras, mas parece que um granito pórfiro e o muscovita-xisto, juntamente com rochas gabbroicas, anortositos e peridotitos de um complexo ultramáfico extenso na região, são as rochas mais antigas. A sequência dos muscovita-xistos parece incluir sequências calcárias, como se pode inferir da presença de anfibolitos e cornubianitos na área.

Numa das fases do metamorfismo regional (suspeita-se de várias fases) os gabros e os peridotitos passaram a orto-anfibolitos e rochas cloritóides, que se distinguem dos para-anfibolitos, em primeira aproximação, pela presença de magnetita, ilmenita e esfeno (nas rochas derivadas do complexo máfico-ultramáfico).

Exames petrográficos por M.T. Rocha, do IGUFBA, mostram que os orto-anfibolitos são formados por hornblenda, oligoandesina, quartzo anédrico amebóide (5%) e cerca de 10 por cento de opacos. Algumas vezes, acrescentam-se aos opacos cerca de 5 a 10 por cento de esfeno. Os para-anfibolitos são formados por epidoto, diopsídio, hornblenda, granada; ou diopsídio, quartzo, escapolita, calcita, labradorita. Ocorrem também rochas de composição pouco usual como um exemplo com 50 por cento de epidoto, 40 por cento de quartzo e 10 por cento de esfeno. O granito (gnáisse) de grão fino é formado por microclina, albita, quartzo.

A área entre a cidade de Floresta e a serra do Arapuã, cerca de 20 a 25 km ao norte, mostra três conjuntos estruturais distintos:

- a) ao sul, próximo de Floresta, faixas paralelas de granito, anfibolitos (orto e para) de direção geral próxima de E-W;



- b) ao centro, um domo elíptico alongado segundo E-W, onde se encontra o Serrote das Pedras Pretas em que predominam rochas silico-aluminosas;
- c) ao norte, uma estrutura arqueada aberta para leste, com rochas silico-aluminosas no núcleo.

Outros traços estruturais gerais são mostrados no mapa geológico obtido a partir de imagens do LANDSAT (Fig. 1).

A foliação com frequência inclina-se para o norte, com valores de mergulho na faixa  $25^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ . O bandamento e a foliação praticamente se confundem, onde possível observar. Os muscovita-xistos são as rochas que exibem mais nitidamente a foliação. Os granitos porfirios muitas vezes não mostram orientação com clareza.

### 3 - GEOQUÍMICA

Os resultados de análises geoquímicas da fazenda Exú, são apresentados na Tab. 1. O minério é composto de uma parte de minerais silicatados e uma parte de minerais oxidados. Estudos petrográficos por I. A. Viana mostraram que podem ser distinguidos quatro tipos de minérios, segundo suas composições mineralógicas:

- a) iddingsita, magneto-ilmenita, carbonato, tremolita, clorita;
- b) hornblenda, plagioclásio, biotita;
- c) hornblenda, plagioclásio, magneto-ilmenita;
- d) clino-piroxênio, magneto-ilmenita, hornblenda, clorita.

Zonas de tremolita bem formada são frequentes tanto na jazida da fazenda Exú, como em outras jazidas existentes na área estudada.

Os grãos de ilmenita e de magnetita têm diâmetro inferior a meio milímetro, e o intercrescimento desses dois minerais aparece com pouca frequência. Em moagem, quando o produto passa em malha 60 (perto de um quarto de milímetro) consegue-se uma liberação entre 75 e



85 por cento dos grãos de ilmenita e de magnetita e, por concentração, é possível obter um concentrado de ilmenita com 46-48% de  $TiO_2$ .

O concentrado de magnetita costuma apresentar entre 0,9 e 1,8% de vanádio ( $V_2O_5$ ).

O concentrado de ilmenita apresenta como impurezas principais o manganês e cromo.

É notável, no minério, a quase ausência de fósforo, tântalo, columbio e lantanídeos. Por esse motivo fica bem reduzida a probabilidade de filiação carbonatítica.

A presença de anortositos, orto-anfibolitos, metaperidotitos e diopsiditos sugere uma filiação ígnea máfica à ultra-máfica.

### 3.1 - FATORES DE DECISÃO DA APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS DO SATÉLITE LANDSAT

Após os estudos de superfície (poços, trincheiras) da jazida da fazenda Exū (Serrote das Pedras Pretas), foi executado um programa de sondagem rotativa com três objetivos:

- a) conhecer o comportamento do minério em profundidade;
- b) verificar a continuidade em profundidade;
- c) estimar a reserva.

Furos ao norte do contacto, no sentido de mergulho, não atravessaram o corpo de minério e mostraram que a jazida estava truncada ao norte por deslocamentos (falhas) o que limitava a reserva ao minério esperado. Como essa reserva estava muito próxima do limite considerado econômico, decidiu-se, por questão de segurança, iniciar um programa de prospecção para, em prazo curto, descobrir novas jazidas de ilmenita primária. Dessa maneira se elevaria a reserva a um nível mais compatível com os parâmetros econômicos desejáveis num empreendimento de longa duração.

Regionalmente, existem zonas de para-anfibolitos, que favorecem um solo vermelho vivo, argiloso, bem semelhante ao solo da jazida da fazenda Exú. Todavia, nas zonas de para-anfibolitos têm sido notados:

- a) de um lado, a ausência de magnetita;
- b) de outro lado, a presença de seixos de quartzo branco tingidos de cor rosa, vermelho claro e ocre, sugerindo escassez de ferro e manganês (e talvez cromo?) em comparação com as zonas mineralizadas com Ti-V.

A observação visual torna-se quase impossível distinguir entre os solos formados sobre os orto-anfibolitos e os solos derivados dos para-anfibolitos. Porém, no analisador I-100 do INPE, as imagens do LANDSAT exibem diferenças de reflectância para os solos, como se discutirá no capítulo apropriado.

Do ponto de vista da morfologia, as jazidas de ilmenita não parecem obedecer a qualquer modelo. No Serrote das Pedras Pretas, a jazida, como se mencionou anteriormente, tem decidida expressão topográfica. A jazida de Lagoa do Angico ocorre em meia encosta e recebe, na sua metade oriental, uma fraca cobertura de areia de quartzo que mascara a jazida. Em riacho da Posse, mais a oeste, a área de jazida é absolutamente plana. E, finalmente, a jazida de Lagoa da Caatinga ocupa uma pequena depressão. Portanto, inexistem aspectos fisiográficos capazes de distinguir jazidas de áreas estêreis, pelo uso desse parâmetro na análise de fotos aéreas.

Essas e outras considerações do mesmo tipo, levaram-nos a decidir, entre junho e julho de 1978, pela aplicação da classificação automática de dados do LANDSAT, no analisador I-100, do INPE.

Feito um teste inicial, com resultado favorável, iniciou-se a pesquisa na área de interesse (aproximadamente 500 km<sup>2</sup> foram analisados). Devido a se ter encontrado resultados positivos, de alta

eficiência, em prazo relativamente curto, decidiu-se pela divulgação do assunto, a fim de que a técnica de classificação automática de dados do LANDSAT, como nova ferramenta na pesquisa mineral, pudesse ser melhor conhecida e principalmente avaliada pela comunidade de usuários potenciais.

#### 4 - O SISTEMA I-100 E O PROGRAMA "MAX VER"

##### 4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

As classificações automáticas do trabalho foram realizadas a partir de fitas CCT (compatíveis com computadores) dos 4 canais da imagem LANDSAT nº 175306-114207 de 02/nov./75, no Analisador I-100 do INPE - INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - em São José dos Campos, SP.

A seguir são apresentadas algumas características e funções básicas do sistema I-100, como também discutido resumidamente o Programa de Classificação utilizado.

##### 4.2 - O ANALISADOR IMAGE-100 (I-100)

O Imagem-100 da General Electric corresponde ao mais moderno sistema de análise de dados naturais atualmente existente no país. Sua função principal é a extração de informações, a partir de dados multiespectrais, baseada no princípio de que os diferentes objetos ou materiais na natureza possuem assinatura espectral própria.

O sistema, utilizando esta propriedade básica, identifica feições ou objetos similares em tonalidades, através da análise simultânea das assinaturas espectrais (reflectância) dos alvos, em diferentes bandas do espectro eletromagnético, estabelecendo assim a correspondência entre as diferentes respostas.

Para que isto ocorra, é necessário a interação do usuário com o aparelho, permitindo-lhe informar quais os objetos (água, rocha, vegetação, solo, etc) de interesse no estudo. Isto é possível através de um cursor que, assumindo diferentes formas e dimensões, é posi

cionado sobre o tema a considerar (no caso do trabalho, por exemplo, a região da jazida de ilmenita conhecida), permitindo assim a extração pelo sistema das assinaturas espectrais do alvo, nas diferentes bandas do espectro (canais 4, 5, 6 e 7 do LANDSAT).

Denomina-se "treinamento" a este processo de informação do tema a analisar e a consequente extração dos seus padrões ou propriedades espectrais.

Ao final desta fase, o sistema analisa toda a imagem ou determinada área de interesse, nas diferentes bandas, em escala adequada, pixel a pixel\*, e estabelece se as propriedades espectrais de cada pixel correspondem a aquelas já definidas a partir do alvo de interesse amostrado. A este procedimento é dado o nome de "classificação".

O sistema I-100 possui programas que realizam esta classificação, sendo utilizado, neste estudo, aquele baseado no critério de máxima verossimilhança ou "Programa Max Ver".

O produto final da classificação é um mapa temático, com a distribuição das áreas que exibem características espectrais similares às estabelecidas para o alvo de interesse. Tais temas, são mostrados em um vídeo de TV colorida, podendo ser documentados por filmes, impressões gráficas, etc.

Um aspecto importante a mencionar refere-se a característica da classificação no I-100 ser supervisionada, no sentido que cabe ao usuário definir as áreas de amostragens, bem como, através de conhecimentos prévios, decidir se a classificação obtida exibe confiabilidade.

---

\* *PIXEL: menor elemento de informação contido na imagem*

#### 4.3 - O PROGRAMA "MAX VER"

O programa "Max Ver" (VELASCO et al., 1978), destina-se à classificação ponto a ponto de imagens multiespectrais obtidas, em geral, de satélites. O critério usado na classificação é o de máxima verossimilhança (maximum likelihood) segundo classes escolhidas interativamente pelo usuário.

O uso do programa é dividido em duas fases distintas: treinamento e classificação.

Na primeira, o usuário escolhe várias classes (no trabalho foram consideradas: ilmenita, estéril 1, estéril 2, açude e rio, respectivamente) e são determinados os parâmetros média e covariância para cada classe.

Tais parâmetros possibilitam o cálculo das probabilidades de um ponto qualquer na imagem (pixel) pertencer a cada uma das classes consideradas.

A classificação pelo critério da máxima verossimilhança procura, dado um ponto  $x$ , achar a classe  $y$ , tal que, a probabilidade de  $x$  pertencer a  $y$  seja a máxima, sendo-lhe então atribuído tal classe.

A participação do usuário no treinamento está não só no conhecimento dos dados de campo, para a melhor definição das classes, como também na escolha das amostras mais adequadas que as representem. Nessa escolha reside a interação do sistema com o usuário, pois este tem meios para adquirir e subtrair amostras, até que seja obtida a certeza de uma boa classificação.

Ao se iniciar o treinamento, o sistema lê quantos canais serão envolvidos na análise. Embora as imagens do LANDSAT sejam obtidas em quatro canais, nem sempre é conveniente usá-los em sua totalidade. Às vezes, um dos canais não fornece informação em bom nível, ou exibe ruído. A classificação será mais rápida, quanto menor for o número de canais utilizados.

O passo seguinte será a determinação dos parâmetros das classes. Para isso escolhem-se amostras que as acompanham. Não há limite no número de amostras por classes e, sim, na quantidade total de amostras que possam ser adquiridas simultaneamente. As amostras são adquiridas posicionando-se o cursor na região desejada e especificando-se a qual das classes a amostra deva pertencer.

A classificação será tanto melhor quanto mais "separadas" uma das outras estiverem as classes.

O usuário deve também utilizar uma constante real positiva, "o limiar", com a qual será feita a classificação. Na essência, o limiar dá ao usuário a possibilidade de variar o rigor com que é feita a classificação. Quanto menor o limiar, mais rigorosa será a classificação.

Ainda na fase do treinamento, são fornecidos ao usuário, meios de avaliar se as classes estão ou não separadas. Um deles é a "matriz de classificação", em que é apresentada uma previsão dos resultados da classificação. Nesta matriz, cada linha corresponde a uma classe. A primeira coluna apresenta a percentagem dos pontos da classe que não serão classificados. As outras colunas correspondem às percentagens estimadas dos pontos da classe  $i$  que serão classificados como pertencentes à classe  $j$ . Para  $i=j$  teremos pontos corretamente classificados.

A matriz permite, deste modo, avaliar quais classes estão sobrepostas e quais estão separadas. No caso de classes cujas distribuições se sobrepõem, duas possibilidades são aventadas: imprecisão na aquisição das amostras ou as classes exibem realmente grande similaridade.

Neste último caso, nada pode ser feito pelo sistema. No primeiro, porém, pode-se aumentar a separabilidade das classes através da mudança das amostras que as constituem, subtraindo ou adicionando novas amostras.



Uma vez satisfeito com as classes obtidas, o usuário requisita a classificação de toda a área de interesse, sendo esta realizada independentemente.

## 5 - METODOLOGIA: ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Na Fig. 2 estão sumariadas em um fluxograma básico as etapas de desenvolvimento do trabalho.

De maneira geral, tais etapas podem ser reunidas em duas fases distintas: a de análise de dados no I-100 e a de verificação de campo.

### a) ANÁLISE DE DADOS NO I-100

Inicialmente, os dados de interesse relativos aos 4 canais de imagem MSS do LANDSAT, formatados em fitas magnéticas adequadas à análise por computadores, são armazenados na unidade de memória do Sistema I-100.

O passo seguinte consiste na obtenção de uma ampliação na escala 1:100.000, no vídeo de TV colorida do sistema, abrangendo a área de interesse de estudo (no trabalho, a região da jazida de Ilmenita conhecida da fazenda Exú, área de interesse da INORCAL para a pesquisa). As composições coloridas nesta escala, mostrando os aspectos regionais da área, são obtidas, atribuindo-se aos canais do LANDSAT, combinações de filtros coloridos (azul, verde e vermelho), passíveis de manipulação e regulagem, em brilho e contraste de cena, através de teclas e botões, presentes no painel de vídeo.

Com base em dados conhecidos do terreno, são estabelecidas na ampliação colorida no vídeo, áreas de amostragem mais adequadas para as classes definidas para a fase de treinamento.

No estudo foram consideradas áreas de amostragem para cinco classes: Ilmenita - considerada como área de amostragem a região

da jazida da fazenda Exú; Estéril I e II-consideradas áreas de amostragens algumas regiões onde a ausência de ilmenita era comprovada; Drenagem-área de amostragem escolhida num trecho do rio Pajeú; Açude - considerados como áreas de amostragem dois açudes próximos à jazida de Exú.

A partir destes dados são determinados pelo I-100 os parâmetros média e covariância para cada classe considerada, sendo fornecidos através do terminal gráfico do sistema, os valores obtidos.

Toda a área é então classificada, utilizando-se um limiar específico e analisando-se o resultado que é apresentado automaticamente no vídeo, através de um tema característico.

Se a classificação obtida não for satisfatória, duas alternativas são possíveis: alteração dos dados da fase de treinamento (ou por redefinição de classes e/ou por novas amostragens) ou nova classificação com variação do limiar.

No trabalho foi inicialmente utilizado o limiar 5,0, sendo então analisada a disposição das áreas classificadas (alarmadas) para ilmenita.

A grande extensão em área alarmada, bem como a presença de algumas regiões classificadas situando-se sobre rochas graníticas, previamente conhecidas como de baixa potencialidade em termos da mineralização, fez com que se optasse por novas classificações, utilizando-se índices de "rigor" mais elevado, ou, em outras palavras, com limites mais baixos (limites 4,5; 4,0; 3,5 e 3,0 respectivamente). A classificação com o limiar 3,5, com seus resultados analisados comparativamente com os de limites superiores, exibiu melhor confiabilidade, sendo deste modo a escolhida.

A utilização de um limiar inferior a 3,5 forneceu áreas alarmadas em pequena quantidade e de características esparsas e pontuais, sendo deste modo desconsiderada.

Definida a classificação mais satisfatória, o resultado final, compondo um tema em cor específica, é superposto na tela à composição colorida da área analisada. Tal superposição visa unicamente auxiliar a localização das áreas alarmadas na verificação posterior de campo.

O produto final é então documentado, ou através de slides do vídeo de TV; ou por gravação em filmes branco e preto ou colorido convencionais, através do conjunto Dicomed; ou ainda por impressão gráfica do tema "printout", fornecido pelo terminal gráfico do I-100.

#### b) PARTE DE CAMPO

No estudo, os produtos do I-100 foram representados por dois tipos de mapas temáticos:

- 1º "slides" obtidos a partir do vídeo de TV colorida do I-100;
- 2º "print out" do computador, fornecido na escala 1:40.000, através do terminal gráfico.

O "print out" foi usado apenas como referência dos alarmes registrados nos "slides".

O "slide" ampliado em cópia de papel, tem resolução aceitável até a escala 1:30.000, mas o limite de escala considerado adequado neste trabalho foi de 1:50.000. O positivo ampliado do "slide" na escala 1:50.000 foi usado em conjugação com as cartas da região publicada pela SUDENE (escala 1:100.000 que fornece excelente ampliação em 1:50.000) e imagem de satélite, colorida, na escala 1:500.000.

Cada área alarmada era examinada em função dos acidentes geográficos cuja identificação correta se fazia com o auxílio da carta ampliada até 1:50.000 e do exame da imagem colorida da região, adquirida no INPE. A localização correta da área alarmada, em função de drenagem, relevo e construções em geral no terreno é crítica no trabalho, nessa região.

Em seguida, a fim de se atingir a área alarmada no terreno, fazia-se sua identificação nas fotografias aéreas escala 1:25.000 obtidas do Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul, com a licença da CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco). A transferência das áreas alarmadas para as fotos aéreas ficou facilitada por se ter conjugado positivo do "Slide" em 1:50.000, cartas 1:50.000 e 1:100.000 e imagem colorida, obtida pelo LANDSAT, na escala 1:500.000.

Na foto aérea, foram registrados pelos meios apropriados: contactos geológicos, drenagem, estradas e outros acessos, cercas, de modo a facilitar o uso da fotografia aérea no terreno.

Porém, quando havia uma densidade muito grande de áreas alarmadas, abriram-se picadas para facilitar o acesso e acelerar a verificação no campo. Ao mesmo tempo procurou-se detalhar a geologia com os dados coletados ao longo das picadas. As informações, nesse estágio, foram registradas na escala 1:10.000. O mapa geológico obtido era confrontado com a distribuição das áreas alarmadas e passava-se a um estudo de detalhe de cada área alarmada.

O estudo de detalhe compreendeu abertura de picadas de direção N-S, a intervalos de 50 m, e amostragem ao longo dessas picadas, a intervalos de 20 ou 25 m.

A razão de se abrir picadas para estudo das zonas de grande densidade de áreas alarmadas, encontra-se nos obstáculos naturais do terreno na região, e na escassez ou ausência de pontos de referência. A atividade agrícola restringe-se às áreas de aluviões mais largos, o que deixa grandes vazios cobertos pela vegetação natural, com raras trilhas e caminhos.

A distribuição da vegetação na região de Floresta está diretamente relacionada com o tipo de rocha. A topografia é essencialmente plana, e muitos interflúvios têm o relevo achatado de um tabuleiro. Os solos são normalmente delgados sobre as rochas de composição sílico-aluminosa, entre 20 e 40 cm de espessura. As rochas máficas produ

zem solos mais profundos, 60 a 80 cm e às vezes mais, com um manto de alteração que pode atingir 15 a 20 m de profundidade. Resulta uma vegetação rala sobre as áreas de rochas félsicas, onde os afloramentos são frequentes, e uma vegetação mais densa sobre as áreas de rochas máficas.

A vegetação é arbustiva, a maioria das plantas tem galhos de pequeno diâmetro e forte elasticidade. São numerosas as plantas com espinhos e plantas urticantes, bastante desconfortáveis quando tocadas. Além delas, há certas plantas como o gravatã e a macambira, tipos de bromélia, que crescem em tufos contínuos de 10 até 100 m de diâmetro, e funcionam como obstáculo natural à penetração no terreno. Esses obstáculos terminam por desorientar a pessoa no terreno. Por esse motivo se optou por penetração através de uma rede de picadas que, neste trabalho, atingiu um comprimento global de 600 km.

Atingida e identificada a área alarmada no terreno, procedeu-se à coleta normal de dados relevantes para o trabalho em execução. Anotavam-se cor e textura do solo, litologia, alguns aspectos da vegetação, presença e tipo de coloração de seixos de quartzo, presença de fragmentos de rocha máfica e de ilmenita, concreções ferruginosas e chert ou calcedonia. A rocha máfica e a ilmenita eram amostradas para petrografia e análise química respectivamente.

Muitas áreas alarmadas não apresentavam à superfície fragmentos de ilmenita, como no Serrote das Pedras Pretas. A ilmenita ocorria em grãos finos e disseminada na rocha. Esse fato, no início do programa, deu a impressão (falsa) de ausência de ilmenita.

Em seguida preparou-se um esboço geológico da área alarmada complementado com dados de poços e trincheiras. Os poços e trincheiras forneceram amostras para análise química.

Com apoio em estudos petrográficos e em análises químicas, fazia-se uma avaliação da área alarmada ou alvo.

Onde os resultados foram favoráveis, partiu-se para um programa de sondagens rotativa e avaliação econômica do jazimento.

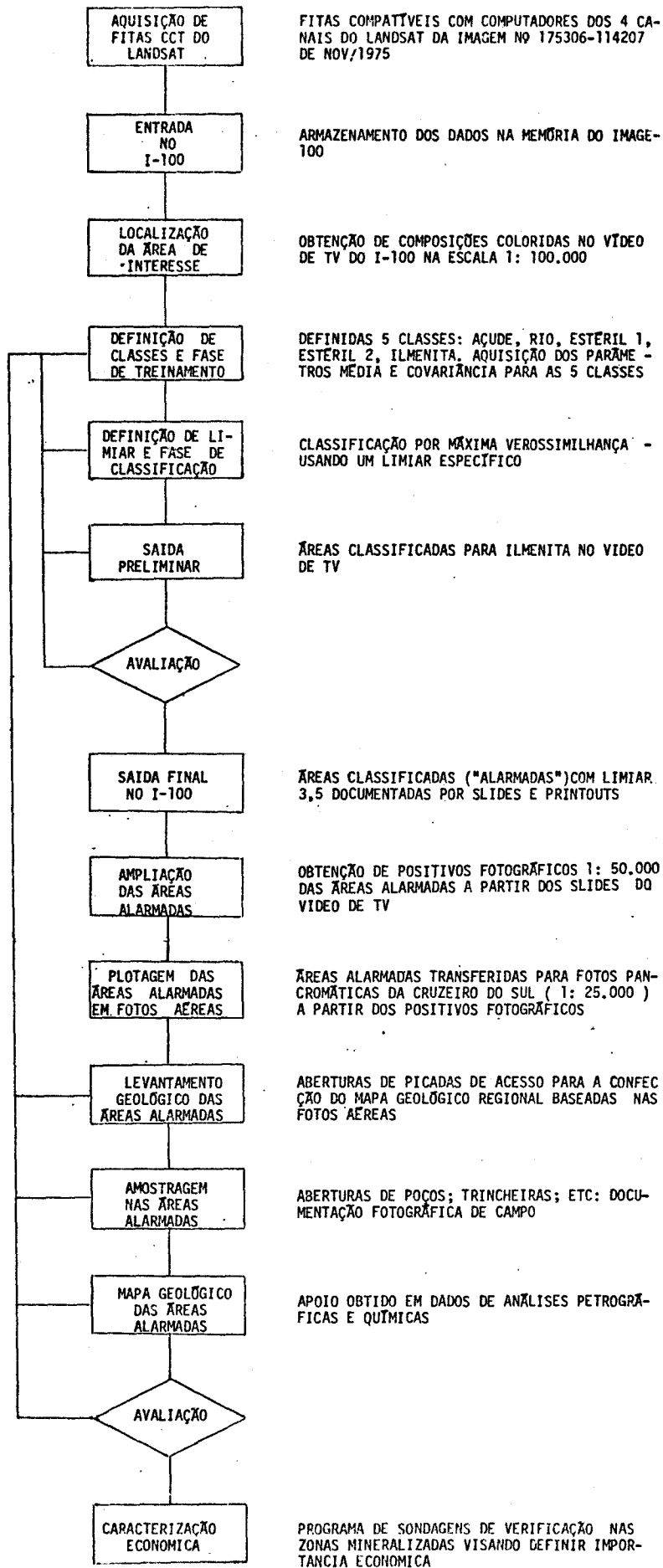


Fig. 2 - Fluxograma Básico das Etapas do Trabalho.

Como a espessura de alteração (por intemperismo) pode atingir até 15-20 m, mesmo jazidas com 5%  $TiO_2$  poderão se revelar econômicas, pois poderão ser tratadas como aluvião ilmenítico (o comportamento físico é o mesmo). Considerada a existência simultânea de magnetita vanadifera, o rejeito da concentração de ilmenita tem expressivo significado econômico e tende a viabilizar a implantação de uma unidade de titânio-vanádio.

## 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fig. 3, são apresentadas a região de desenvolvimento da pesquisa e a localização das áreas de amostragens para as cinco classes consideradas na classificação "Max Ver".

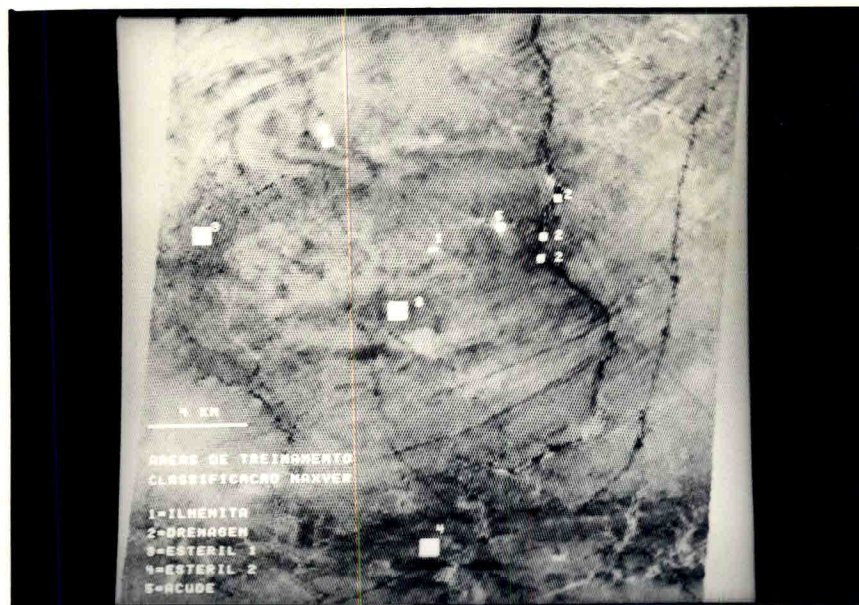


Fig. 3 - Canal 7 do LANDSAT mostrando áreas de amostragens para as classes consideradas.

Na Figura 4, é exibido o mapa temático final, mostrando as regiões alarmadas para ilmenita, utilizando o limiar 3,5.



Fig. 4 - Mapa temático final mostrando áreas alarmadas para ilmenita.

Na Figura 5, o mesmo mapa temático da foto anterior está superposto à imagem realçada por "Contrast Stretch" do canal 7 (0,8-1,1  $\mu\text{m}$ ) do LANDSAT. Tal procedimento visou facilitar a localização e planejamento de acesso às áreas potencialmente favoráveis à presença de ilmenita, na fase de verificação de campo.

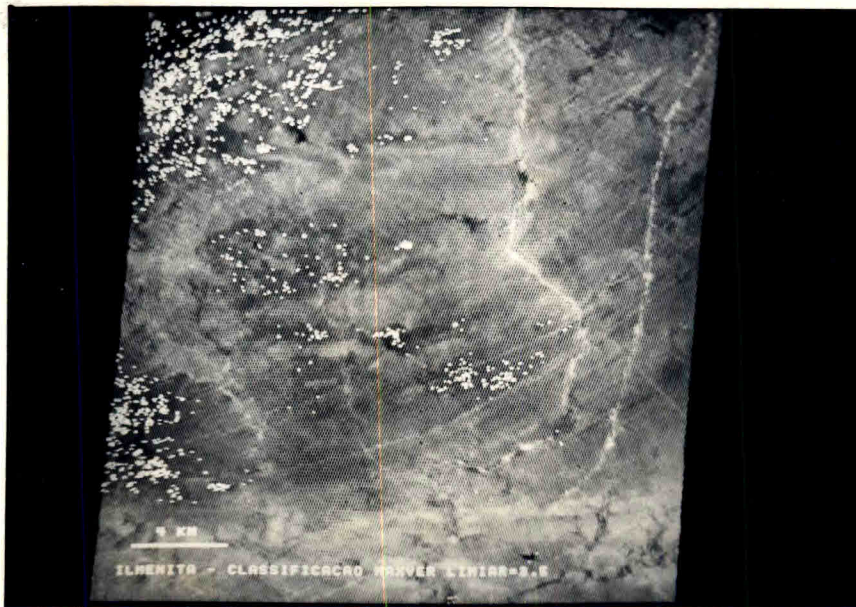


Fig. 5 - Mapa temático final superposto ao canal 7 realçado.



Os parâmetros da classificação fornecidos pelo I-100 (média, matriz de covariância e matriz de classificação) estão apresentados na Tabela 2.

Cálculos matemáticos utilizando os valores de média e variância por canal, para a classificação com limiar 3,5, permitiram estabelecer que os canais 7 e 6 foram os que apresentaram melhor separabilidade entre as classes ilmenita e estéril.

A classificação abrangeu uma área de 500 km<sup>2</sup>, que se estende do norte da cidade de Floresta, PE, à oeste (margem direita) do rio Pajeú, afluente do rio São Francisco. Rochas com mais de 6% de ilmenita foram encontradas distribuídas por toda a região, o que favorece em se considerar a área como uma província geoquímica de titânio.

A aplicação de técnicas automáticas de classificação utilizando dados do LANDSAT no analisador I-100 do INPE, na definição de áreas com ilmenita primária, revelou, nesses 500 km<sup>2</sup>, mais de 600 áreas alarmadas. Entre outubro de 1978 e janeiro de 1979, uma parte dessa região, com quase uma centena de áreas alarmadas, foi verificada. Resultaram quatro jazidas de teor médio e pobre (18% a 5% TiO<sub>2</sub>). Duas outras jazidas não alarmadas foram encontradas.

As áreas alarmadas verificadas, sempre corresponderam à áreas de clorita-xisto com magnetita e ilmenita, meta-peridotitos, meta-anortositos e orto-anfibolitos. Em todas elas, o solo ou tinhar cor vermelha ou era coberto por seixos e fragmentos de quartzo tingidos de vermelho a preto, e, fragmentos de rocha, tingidos de cor quase preta na superfície.

As áreas de para-anfibolitos e mica-xistos que estão sob solo vermelho, não produzem alarme pela classificação, o que evidencia que o método tem sensibilidade suficiente, nas condições da região de Floresta, para produzir resultados.

Os alarmes registrados parecem devidos sobretudo à cor do solo e dos fragmentos de rocha e de quartzo. A vegetação e o relevo

teriam ou desempenhado papel secundário ou não tiveram qualquer influência na resposta.

Jazidas muito pequenas, como Lagoa do Angico e Lagoa da Caatinga, não alarmadas, terão seus pixels reanalisados, visando uma comparação de suas reflectâncias com aquelas encontradas na área de amostragem.

É possível que, com redefinições de classes e áreas de amostragens, incluindo-se agora as novas áreas detectadas, na fase de treinamento e utilizando-se um limiar mais elevado na classificação, tais jazidas sejam detectadas.

Incidentalmente, jazidas situadas próximas de fundo de vale, recobertas em sua maior parte por sedimentos arenosos, derivados de granitos topograficamente mais altos (mesmo em encosta de fraca declividade) não exibem muitas condições para a produção de alarmes, visto que os sedimentos arenosos com cor cinzenta e branca mascaram a reflectância original da região mineralizada. Talvez a utilização de fotografias aéreas infravermelho, com a análise das respostas de solo e vegetação nesta outra banda do espectro, possa se revelar mais adequada para a distinção de jazidas de titânio-vanádio sob depósitos de areia na região. A jazida de Lagoa do Angico estará provavelmente neste caso: com 30 a 60 m de largura e 300 m de comprimento, só ao longo de 170 m de sua extensão ocorre solo vermelho. O restante está sob uma cobertura de areia e quartzo.

O fato de todos os alarmes terem correspondido a rochas com 6 a 15% de ilmenita (3 a 8%  $TiO_2$ ), sugere a necessidade de se estudar um refinamento da técnica para distinguir-se entre áreas pobres em ilmenita e áreas com teores mais elevados de ilmenita. A flexibilidade da classificação "Max Ver", permitindo uma nova definição de classes na fase de treinamento (por ex. Ilmenita 1, Ilmenita 2, etc...) baseada nos novos dados de campo, abre a perspectiva do desenvolvimento de estudos, visando este objetivo.

Convém ainda salientar, que o papel desempenhado pelo solo e pela rocha, como sendo os parâmetros que mais influíram nos resultados, pode ser evidenciado por duas razões:

- a) as imagens do LANDSAT utilizadas, correspondem à passagem de novembro, no auge da estação seca na região, quando as plantas estão desprovidas de folhas e vegetação rasteira (e as gramíneas) são raras ou inexitem, o que deixa exposta uma proporção substancial da superfície do terreno. Em áreas de cobertura vegetal densa, talvez os resultados sejam diferentes, necessitando-se de um estudo semelhante a este, após a estação chuvosa.
- b) o solo em sua maior parte deriva da rocha subjacente e reflete sua composição química, sobretudo em termos de elementos corantes como ferro, manganês, cromo, níquel e vanádio, presentes nas mineralizações de ilmeno-magnetita da região.

Dentre estes elementos, o Ferro e o Manganês parecem ser os que mais influem na caracterização da assinatura espectral, principalmente o Ferro, por estar presente em maior proporção e por apresentar uma alta absorção na região do infravermelho próximo, contrastando, assim, com a alta reflectância das áreas estérteis, para este mesmo intervalo do espectro. (Fig. 6).

Este contraste explica o fato de que os canais 7 e 6 apresentem a melhor separabilidade entre as classes ilmenita e estéril, utilizando-se os valores de media e variância de cada classe, por canal.

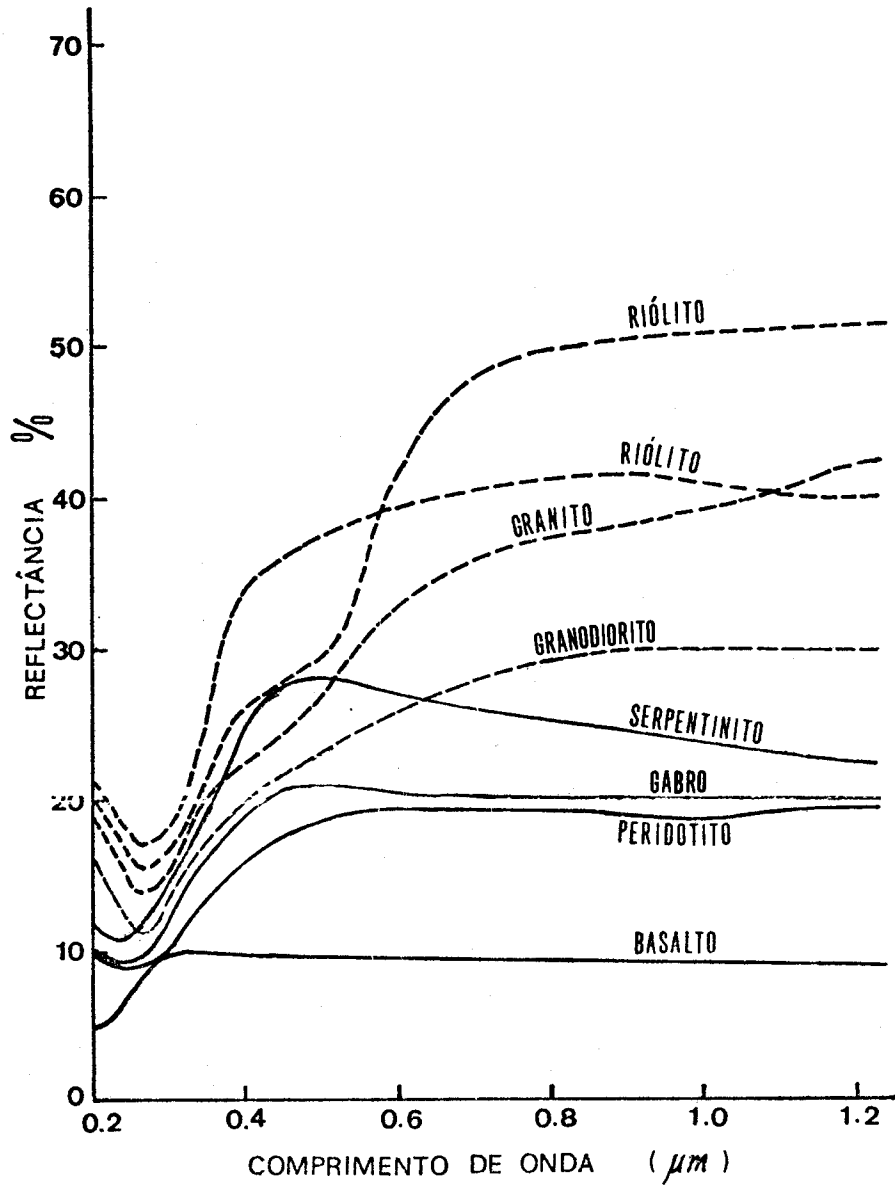


Fig. 6 - Curvas de reflectância espectral para rochas (solos) ricas em ferro e pobres em ferro. O maior contraste está situado nas regiões do vermelho-infravermelho próximo (canais 7 e 6 do LANDSAT). Fonte: Rowan, 1972.

## 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- 1) Os resultados indicam que jazidas de ilmenita, em áreas de clima e ambiente geológico-geoquímico como o de Floresta, podem ser descobertas pela metodologia usada.
- 2) O solo e rocha parecem ter sido os parâmetros mais importantes na definição das áreas alarmadas. A imagem é do período seco, isto é, a vegetação teve influência mínima. Como as zonas mineralizadas exibem em relação as áreas estereis níveis de reflectância menos elevados, acredita-se que se a imagem tivesse sido obtida em período úmido, a cobertura vegetal poderia atenuar os contrastes existentes, principalmente na banda do infravermelho próximo, pelo considerável acréscimo em reflectância que ocasionaria. Estudos adicionais são necessários para definir a importância da vegetação e eventual reprogramação e/ou abordagem.
- 3) O Ferro e o Manganês usualmente associados à ilmenita parecem ter sido os fatores mais importantes na caracterização da assinatura espectral, principalmente o primeiro, que apresenta uma grande absorção na região do infravermelho correspondente ao canal 7.
- 4) A expressão topográfica não parece ter qualquer influência considerando as dimensões e a forma dos jazimentos na caracterização da assinatura espectral.
- 5) A metodologia permitiu reduzir o número de alvos para verificação e, portanto, acelerar os trabalhos de campo, com reflexos saudáveis sobre o custo da prospecção.
- 6) De um total de 70 áreas alarmadas verificadas até 15/01/79, 46 resultaram positivas, o que significa uma eficiência de quase 70%.

- 7) O trabalho poderá ser refinado a fim de se distinguir áreas de orto-anfibolitos e máficas das de para-anfibolitos, e, talvez, áreas de teor alto e teor baixo, ou disseminado fino a maciço, pois nos casos de para-anfibolitos e de minério disseminado fino, reduz-se a proporção de fragmentos escuros à superfície (compostos de seixos de quartzo, de rocha e de ilmenita, coloridos de vermelho a preto pelos óxidos de ferro e manganês). A etapa seguinte ao trabalho com o analisador I-100, será verificar se as áreas de baixo conteúdo em ilmenita, reveladas por amostragem em superfície, contêm corpos com alto conteúdo de ilmenita em profundidade. Caso a geofísica se revele um método utilizável na área, são após os levantamentos geofísicos se recomendaria passar à fase de sondagem. A presença de vanádio acredita-se que são será revelada após a sondagem, uma vez que os métodos geofísicos de prospecção não informam os elementos presentes. Recomenda-se também um levantamento geoquímico a fim de investigar:
- a) o conjunto de elementos que caracteriza a mineração de alto teor.
  - b) a possibilidade de se distinguir, pela análise de amostras de rochas e de solo próximos da superfície, áreas com vanádio e áreas sem vanádio.
- 8) O nível de sucesso da técnica depende fundamentalmente dos dados fornecidos pelo usuário.
- 9) A proporção de  $Fe^{+++}/Fe^{++}$  é maior nas áreas alarmadas. Existem elementos traços que podem ser inibidores da oxidação do Ferro e a presença e influência de tais elementos devem ser investigadas, dentro do enfoque da caracterização da assinatura espectral de áreas com ilmenita-vanádio.
- 10) A metodologia depende essencialmente de uma fase intensa e bem planejada de trabalhos de campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao operador José Carlos Moreira e ao Engº Ricardo Cartaxo M. de Souza, do INPE, pelo auxílio nas classificações e discussões de resultados do I-100.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA FILHO, R.; PARADELLA, W.R. *Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens LANDSAT com ênfase em mineralizações radioativas.* São José dos Campos, INPE, 1977. (1112-TPT/065).

\_\_\_\_\_. *Mapeamento automático de áreas favoráveis à ocorrência de argilas no planalto de Poços de Caldas.* São José dos Campos, INPE, 1977. (1067-NTI/089).

ALMEIDA FILHO, R.; PARADELLA, W.R.; PEQUENO, V.S. *Identificação de áreas de argila na região das cabeceiras do Rio Claro (MG), através de análises automáticas de dados do LANDSAT.* São José dos Campos, INPE, 1976. (964-NTE/073).

GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Image 100 interactive multispectral image analysis system (user manual).* 1975, Flórida, USA.

ROWAN, L.C. *Applications to geologic mapping and mineral exploration.* 1972, in: 4th Annual Earth Resources Program Review, VII, U.S.G.S. Programs.

VELASCO, F.R.D.; PRADO, L.O.C.; SOUZA, R.C.M. *Sistema maxver: manual do usuário.* São José dos Campos, INPE, 1978. (1315-NTI/110).



TABELA 1

ANÁLISE GEOQUÍMICA DA ILMENITA MACIÇA DE SERROTE DAS PEDRAS PRETAS (FAZENDA EXU - FLORESTA - PERNAMBUCO)

(Análise por Barbara I. Kronberg Dept. Geologia Univ. Western Ontario, London, Canada, Oct. 1977)

DADOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (%)			DADOS DE ESPECTROMETRO DE CHAMA (SPARK SOURCE MASS SPECTROMETRO) (em ppm)					
ELEMEN TO	CONC. ILME NITA	GANGA	ELEMEN TO	CONC. ILME NITA	GANGA	ELEMEN TO	CONC. IL MENITA	GANGA
SiO <sub>2</sub>	1,27	39,36	B	0,5	15	Ag	>0,01	-0,3
TiO <sub>2</sub>	43,06	13,23	F	>500	>500	Cd	>0,1	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,97	0,73	S	-40	-130	Sn	1	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50,59	22,90	Cl	15	>150	Sb	0,3	1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,07	Sc	30	100	I	>1	>1
Mn O	0,56	0,26	V	400	>>400	Cs	>0,1	>0,1
Mg O	2,22	18,05	Cr	2	20	Ba	20	7
Ca O	0,10	0,68	Co	10	400	La	>0,1	0,2
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,17	Ni	15	150	Ce	0,5	2
K <sub>2</sub> O	0,03	0,00	Cu	20	500	Pr	>0,2	0,2
Ba O	0,43	0,14	Zn	120	360	Nd	>0,1	1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,58*	0,18*	Ga	1	60	Sm	>0,3	>1
			As	>0,1	2	Eu	>0,1	>1
			Ge	1	1	Gd	>0,5	>1
			Se	>0,1	0,3	Tb	>0,1	>1
			Br	>0,1	>0,1	Dy	>0,5	>1
			Rb	>0,1	>0,1	Ho	>0,3	>1
			Sr	0,3	1	Er	>1	>1
			Y	0,1	0,3	Tm	>0,3	>1
			Zr	20	20	Yb	>1	1
			Nb	5	1	Hf	>1	>1
			Mo	0,3	0,3	Pb	0,5	2
						Th	>0,5	>1
						U	>0,5	>1

Mineralogia: ilmenita, talco e actinolita

\* não confere com outras análises disponíveis

TABELA 2

PARÂMETROS FORNECIDOS PELO I-100 PARA A CLASSIFICAÇÃO COM LIMIAR 3,5

PARÂMETROS DA CLASSE ILMENITA

Nº DE PONTOS: 12

MÉDIA: 61,50 58,75 50,92 59,58

MATRIZ DE COVARIÂNCIA

	7,58	6,79	3,46	1,21
	6,79	18,02	7,40	9,73
	3,46	7,40	9,24	6,88
	1,21	9,73	6,88	11,08

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO - LIMIAR 3,5

	N	1	2	3	4	5
1. RIO	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2. ACUDE	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3. ESTÉRIL 1	81,1	0,0	0,0	18,9	0,0	0,0
4. ESTÉRIL 2	76,5	0,0	0,0	0,0	23,5	0,0
5. ILMENITA	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	75,0

Classe Ilmenita: área 4621 pixels (1,76% da cena total)