

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DA COMPARTIMENTAÇÃO  
ESTRUTURAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO  
(MINAS GERAIS, BRASIL)

Claudio Riccomini

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT  
Divisão de Minas e Geologia Aplicada  
Agrupamento de Geologia Geral  
Caixa Postal 7141, 05508 - São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

Através da análise integrada de produtos de sensores remotos, tais como imagens RBV-LANDSAT e MSS-LANDSAT (canais 5, 6 e 7, em cópias de papel e fitas CCT's), imagens e mosaicos semicontrolados de radar (MISSÃO 96 da NASA e PROJETO RADAMBRASIL) e fotografias aéreas Ektachrome MS Aerographic e Ektachrome IR Aerographic (MISSÃO 96 da NASA) foi possível a execução de um estudo da compartimentação estrutural do Quadrilátero Ferrífero. A metodologia adotada consistiu basicamente na interpretação visual, inicialmente dos produtos de pequena escala (imagens LANDSAT e de radar), passando por produtos de escala média (imagens MSS-LANDSAT ampliadas e processadas no analisador automático multiespectral Image-100), até os produtos de grande escala (fotografias aéreas). Os produtos da fotointerpretação foram, então, comparados com dados bibliográficos e mapas geológicos disponíveis, ao que se seguiu uma investigação de campo. Como principais resultados tem-se a caracterização de certas estruturas, já a partir de produtos de pequena escala (imagens LANDSAT 1:500 000), algumas delas até então não registradas mesmo nos mapas mais detalhados da região, em 1:25 000. Dentre estas estruturas, destacam-se a grande feição circular dômica, no interior do Complexo Bação, associada ao Granodiorito de Engenheiro Correia, alguns falhamentos, especialmente na borda oeste do Sinclinal da Moeda, bem como evidências de ligação entre as rochas da Serra do Espinhaço com o Quadrilátero Ferrífero, através da Serra das Cambotas. Além disso, observa-se um grande número de lineamentos e algumas feições circulares, cujas relações com estruturas no terreno carecem ainda de trabalhos de campo mais detalhados para serem elucidadas.

ABSTRACT

Through integrated analysis of remote sensing products, such as RBV - LANDSAT and MSS - LANDSAT imagery (channels 5, 6 and 7, in papers copies and computer compatible tapes in the MSS case), radar semicontrolated mosaics and imagery (NASA Mission 96 and RADAMBRASIL Project) and aerial Ektachrome IR Aerographic and Ektachrome IR Aerographic photographs (NASA Mission 96), it's been developed a study of structural compartmentation of Quadrilátero Ferrífero. The followed methodology consisted basically on visual interpretation, first of the small scale products (LANDSAT and radar imagery), and afterwards of the middle scale products (LANDSAT MSS enlarged and processed in the Image-100 computer), and finally the great scale products (aerial photographs). The results obtained from photointerpretation were then compared to available geological maps and bibliographic data, following a field investigation. The main results of this study are the characterization of certain structures beginning with small scale products (LANDSAT imagery at 1:500 000 scale), some of them insofar not recognized even in the more detailed maps of the region, at 1:25 000 scale. Among these structures, the most important is the great circular dome shaped feature within the Bação Complex, associated to the Engenheiro Correia Granodiorite, some faults, specially those of the western border of the Moeda Syncline, as well as the evidences of the linking between the rocks of the Serra do Espinhaço and Quadrilátero Ferrífero, trough the Serra das Cambotas. Besides that, it was identified a great number of lineaments and circular features, whose relations with terrain structures still need more detailed field work to be elucidated.

## 1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero foi a primeira região brasileira a ser utilizada como área - teste em sensoriamento remoto para fins geológicos. A Missão 96 (NASA, 1969), executada em convênio com a CNAE (Comissão Nacional de Aeronáutica e Espaço, atualmente INPE) pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), acumulou grande quantidade de material incluindo imagens de radar de visada lateral, fotografias aéreas coloridas normais, infravermelhas em falsa cor e multiespectrais, além de imagens termais. Além disso, existe um razoável número de imagens (cenas) LANDSAT de boa qualidade, passíveis de interpretação visual e análise automática, mosaicos semicontrolados de radar de visada lateral do Projeto RADAMBRASIL, bem como alguns mapas aeromagnetométricos.

Do ponto de vista geológico, a região do Quadrilátero Ferrífero é, com efeito, muito bem conhecida, em virtude sobretudo, da abundância de recursos minerais (ferro, ouro, manganês, etc) presentes na mesma. Muitos geólogos perscrutaram a região nos últimos cento e cinquenta anos, incluindo alguns dos pioneiros da Geologia do Brasil como W.L. Von Eschwege, H. Gorceix, Orville A. Derby e outros. Modernamente podemos destacar os trabalhos dos técnicos da equipe DNPM-USGS (Departamento Nacional da Produção Mineral-United States Geological Survey), de cujo levantamento resultaram mapas geológicos de detalhe de quase toda a região, com sínteses apresentadas por Dorr II et alii (1959), Dorr II (1969) e Herz (1970, 1978).

Esta combinação de fatores, ou seja, a abundância de estudos geológicos e a variedade de produtos de sensores remotos disponíveis, aliado ao fato de grande parte destes últimos estarem armazenados no banco de dados do INPE, tornou essa região especialmente favorável para a execução do estudo aqui apresentado.

Este artigo visa a divulgação de algumas idéias acerca dos aspectos estruturais da região, formuladas através da realização de um projeto mais amplo (Riccomini, 1982), que teve como objetivo geral o desenvolvimento de um estudo comparativo entre os diferentes tipos de sistemas sensores utilizados na região do Quadrilátero Ferrífero, através dos produtos por eles obtidos, com a finalidade de avaliar as suas potencialidades em análises litológico-estruturais. Como objetivos mais específicos podemos destacar: a) promover uma reavaliação dos dados geológicos disponíveis para a região do Quadrilátero Ferrífero, com o apoio dos produtos de sensores remotos; b) testar o nível de aplicabilidade dos dados de sensoriamento remoto em análises litológico-estruturais, em diferentes escalas, através da caracterização das estruturas e litologias em vários níveis, com correspondência nos diferentes produtos de sensores remotos disponíveis

para a região; c) verificar a aplicabilidade dos dados na prospecção de recursos minerais; d) elaborar um modelo de análise integrada de dados geológicos com dados de sensoriamento remoto, visando uma aplicação tentativa em áreas geologicamente semelhantes.

## 2. FONTES DE INFORMAÇÃO E METODOLOGIA

### 2.1. Materiais disponíveis

Além do vasto material bibliográfico e cartográfico, a região do Quadrilátero Ferrífero dispõe de um significativo volume de produtos obtidos por sensores remotos, a diferentes altitudes.

Em nível orbital, têm-se as imagens MSS-LANDSAT, nos canais 4, 5, 6 e 7, em escalas 1:1 000 000, 1:500 000 e 1:250 000 além de imagens RBV-LANDSAT, com escalas de apresentação em 1:500 000, 1:250 000 e 1:100 000, todas em cópias de papel, além de raras imagens da estação orbital Skylab, apenas para o extremo oeste da área.

Imageamentos por radar foram executados inicialmente pela Missão 96 da NASA (National Aeronautics and Space Administration) em cooperação com a CNAE (Comissão Nacional de Atividades Espaciais, atualmente INPE) em julho/1969 (NASA, 1969), com radar de visada lateral com configuração de abertura real (Philco-Ford DPD-2), operando em faixa de 16.5 GHz (Banda Ku) e produzindo imagens na escala aproximada de 1:360 000. Posteriormente, o Projeto RADAMBRASIL, iniciado em 1972 executou o levantamento por radar de todo o território brasileiro. O equipamento utilizado foi o radar de visada lateral de abertura sintética (Goodyear APQ-102T), operando na faixa de 8.0 a 12.5 GHz (Banda X), cujas imagens após o processamento, são apresentadas sob a forma de mosaicos semicontrolados em 1:250 000 e fotoíndices em 1:1 000 000.

Vários aerolevantamentos também são disponíveis para a região (toda ou em parte), obtidos sobretudo com filmes pancromáticos em preto e branco, em diferentes escalas (Divisão de Águas do DNPM, 1949, em 1:10 000; Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul, 1950, em 1:25 000; Missão AST-10 da FAB - USAF, 1964, em 1:60 000; etc). Entretanto, dignas de nota pelas suas características especiais são as fotografias aéreas obtidas com filmes Ektachrome MS Aerographic e Ektachrome IR Aerographic em 1:42 000, e fotos pancromáticas com filmes Plus-X e filtros vermelho, azul e verde e filme IR Aerographic, todas tomadas pela Missão 96 da NASA. Vale destacar também as fotografias produzidas durante a Missão 110 - SEREMINAS, realizada pelo INPE em 1972 (Almeida e Souza & Martins Jr., 1972), quais sejam: fotografias Ektachrome IR em 1:30 000, Ektachrome MS em 1:90 000, além de fotos em 1:40 000 com filmes Ektachrome MS, Aerochrome IR, Plus-X com filtro vermelho e Plus-X com filtro verde.

Outros produtos disponíveis são as faixas do imageador termal RS-14, operando na faixa

de 8.0 a 14.0  $\mu\text{m}$ , na escala aproximada de 1:35 000, e perfis térmicos do sensor PRT - 5 (Precision Radiation Thermometer) que mede a radiação aparente no intervalo 8.0 - 14.0  $\mu\text{m}$  de modo a estabelecer uma relação quantitativa com as imagens termais. Estes dois produtos foram também obtidos pela Missão 96 da NASA (NASA, 1969). Imagens termais em 1:20 000 foram também obtidas para a região de Itabira pela Missão SEREMINAS (Almeida e Souza & Martins Jr., 1972).

Finalmente, embora fujam à categoria dos sistemas sensores, conforme a concepção atual destes, valem ser lembrados os mapas aeromagnetométricos nas escalas 1:1 000 000, 1:500 000 e 1:100 000 obtidos no período de 1972 - 1973 pelo Convênio Geofísico Brasil - Alemanha.

## 2.2. Produtos de sensores utilizados

Dentre os diferentes produtos de sensores remotos disponíveis para a região, apenas alguns tiveram utilização mais ampla. De modo geral, a escolha dos materiais foi feita no sentido de se obter certa diversidade destes sobre uma mesma área. Além disso, levou-se em conta a qualidade, disponibilidade e a possibilidade de interpretação detalhada e cuidadosa do material, bem como o grau com que determinado produto já foi explorado. Assim foram utilizados principalmente os seguintes produtos:

a) Imagens LANDSAT: Foram utilizadas as imagens MSS e RBV-LANDSAT, além de fitas CCT's, compatíveis com o analisador automático Image-100. No tocante à imagens RBV, utilizou-se apenas duas subcenas, uma vez que até o momento não existe uma cobertura completa da área isenta de nuvens.

b) Projeto RADAMBRASIL: mosaicos semicontrolados de radar de visada lateral de abertura sintética, em 1:250 000.

c) Missão 96 da NASA: Os "strips" de imagens de radar de visada lateral de abertura real e as fotografias Ektachrome IR Aerographic e Ektachrome MS Aerographic foram os produtos da missão utilizados no trabalho. Com respeito às fotografias aéreas IR deve-se ressaltar que algumas delas não puderam ser recuperadas, verificando-se lacunas em algumas faixas. Nesse caso, estas lacunas foram preenchidas com fotografias MS cuja cobertura, ao menos para a área de interesse, estava completa.

Por diversas razões, já discutidas em trabalho anterior (Riccomini, 1982), os demais produtos disponíveis para a região foram utilizados apenas a nível de consulta ou não foram analisados.

## 2.3. Metodologia

A metodologia empregada seguiu, de modo geral, as seguintes etapas: a) coleta de materiais e pesquisa bibliográfica; b) interpretação de imagens MSS LANDSAT em 1:500 000; c) interpretação de imagens MSS e RBV LANDSAT, e

mosaicos RADAMBRASIL em 1:250 000, e "strips" de radar da Missão 96 da NASA em escala aproximada 1:360 000; d) análise automática de fitas CCT's do satélite LANDSAT no analisador Image-100 (primeira etapa); e) trabalhos de campo (primeira etapa); f) reinterpretação de imagens; g) análise automática no Image-100 (segunda etapa); h) interpretação de fotografias aéreas MS e IR em 1:42 000 da Missão 96; i) trabalhos de campo (segunda etapa); j) análise dos dados petrográficos; k) integração de dados; l) conclusões.

Este conjunto de etapas só foi executado na íntegra para a área do Complexo de Bação. Para as demais, os trabalhos foram concluídos em um menor número de etapas, que variou para cada área até o ponto em que os resultados obtidos fossem considerados satisfatórios para a consecução dos objetivos propostos.

Para a interpretação visual de imagens LANDSAT foram utilizados os critérios correntes de fotointerpretação, baseados, fundamentalmente, nas propriedades texturais, tonais, morfológicas e estruturais dos alvos. As características multiespectrais das imagens MSS LANDSAT manifestam estas propriedades em maior ou menor grau, dependendo da faixa do espectro eletromagnético em que os diversos canais operam.

As diferentes unidades fotogeológicas foram delimitadas principalmente com base em suas características texturais (morfologia, padrão de drenagem) e, secundariamente, com base em diferenças tonais (diferentes tons de cinza), pois esta última apresenta, em princípio, algumas restrições em áreas com atividade humana mais intensa.

Para o traçado dos contatos entre as diferentes unidades fotogeológicas procurou-se sempre tentar verificar a existência de prováveis traços de camadas e pequenas escarpas (rupturas de declive), que podem representar a interface entre diferentes unidades litológicas.

Freqüentemente observou-se que a delimitação das unidades em bases texturais coincidiu com a delimitação em bases tonais, o que tornou este último critério menos restrito quanto ao seu uso. Esta associação, consequentemente, tende a aumentar a confiabilidade da fotointerpretação.

Para a interpretação estrutural procurou-se delimitar feições topográficas indicativas de estruturas. No caso específico de falamentos, tentou-se observar a existência ou não de deslocamentos em determinado conjunto de camadas, cristas, escarpas, ou unidades fotogeológicas, truncamento de unidades por feições lineares, lineamentos.

As denominações lineamentos, linear e lineação seguem, neste estudo, as definições propostas por O'Leary et alii, (1976). Estes autores realizaram um estudo cuidadoso, abordando

a origem dos termos e as diversas definições posteriormente dadas a estes. No sentido de padronizar estas denominações, O'Leary et alii (op.cit.) propuseram as seguintes definições:

a) lineamento - é uma feição mapeável simples ou composta de uma superfície, cujas partes estão alinhadas de forma retilínea, ou apresentam relações claramente curvilíneas; diferem nitidamente dos padrões das feições adjacentes, refletindo, presumivelmente, fenômenos de subsuperfície.

b) linear - é um adjetivo que descreve o caráter de semelhança a uma linha de algum objeto ou objetos.

c) lineação - é um alinhamento estrutural unidimensional de componentes de uma rocha; é produzida por agentes externos, não podendo ser representada como numa feição individual sobre um mapa.

Outra propriedade de grande valia na interpretação das imagens é o efeito estereoscópico por elas proporcionado. Este efeito ocorre em duas situações distintas. Na primeira, na área de recobrimento entre duas cenas obtidas em órbitas (e ponto) adjacentes, devido à diferença de paralaxe entre o satélite e feições do terreno presentes nas duas imagens. Todavia, na latitude em que se encontra o Quadrilátero Ferrífero, a faixa de recobrimento é estreita, da ordem de 15%, o que torna a utilização deste efeito relativamente limitada. No segundo caso, pode-se obter o efeito estereoscópico utilizando-se imagens obtidas sob diferentes ângulos de elevação solar, ao qual está associado o efeito de sombreamento das imagens LANDSAT. Diferenças da ordem de 10° já são suficientes o bastante para produzir um bom exagero vertical. Neste caso, o efeito estereoscópico pode ser obtido em uma cena inteira.

O efeito estereoscópico obtido por diferença de elevação solar apresenta um inconveniente. A elevação solar varia com a época do ano, ocorrendo as maiores diferenças com um período de 6 meses. Neste intervalo de tempo, as estações são também diferentes, com consequentes mudanças no terreno em termos de cobertura vegetal, umidade, etc. Além disso, varia também o azimute dos raios solares, produzindo realces topográficos levemente diferentes no correr do ano, ocorrendo os maiores realces em feições do terreno com direções perpendiculares ao azimute dos raios solares. Conseqüentemente, as características tonais e texturais dos alvos nas imagens variam no decorrer do ano.

Assim, embora seja mais restrito, o efeito estereoscópico obtido com imagens de órbitas adjacentes contribui de forma mais significativa na interpretação fotogeológica. No caso do efeito por diferença de inclinação solar, devem ser evitadas grandes diferenças de ângulos pois, embora produzam grande exagero

vertical, podem apresentar aspectos tonais e texturais bem diferentes.

O efeito estereoscópico não pôde ser obtido para as imagens RBV pois existe apenas uma passagem de boa qualidade e, ainda assim, restrita à porção oeste da área de interesse.

Para a interpretação dos mosaicos do Projeto RADAMBRASIL e "strips" da Missão 96 da NASA, os critérios foram mais rígidos, seguindo em princípio os estabelecidos para as imagens LANDSAT, com as peculiaridades envolvidas na análise de imagens de radar. Tais peculiaridades advêm sobretudo dos aspectos geométricos dos imageamentos por radar, gerando distorções que podem comprometer a fotointerpretação. Os principais efeitos são os seguintes:

a) Efeito de sombreamento: Este fenômeno ocorre quando o ângulo de inclinação das feições do terreno é maior que o ângulo de depressão (Figura 1). Como o ângulo de incidência dos pulsos de radar varia ao longo da direção de visada do sistema, temos um efeito de sombreamento crescente à partir do "near range" em direção ao "far range". Desta forma, uma feição pode ser completamente iluminada no "near range" e apresentar um grande sombreamento no "far range". Em ambos os casos podemos ter um mascaramento das estruturas. Por outro lado, um terreno homogêneo como o da figura 1 pode apresentar um falso aspecto de diferença da rugosidade ao longo do rumo de visada devido ao efeito de sombreamento.

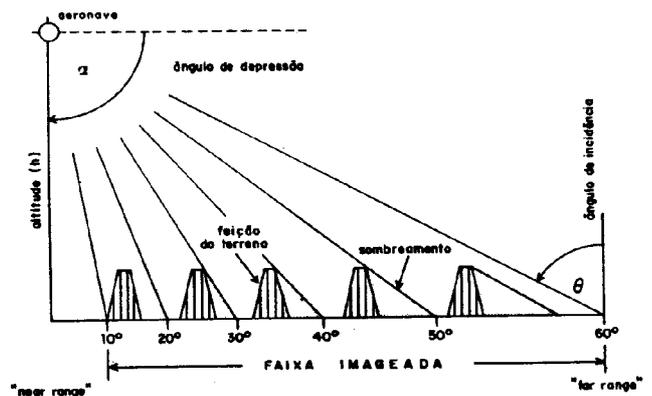


Fig. 1 - Efeito de sombreamento do radar de visada lateral, segundo Mac Donald et alii (1969), p.645 (modificado).

b) Influência da orientação das linhas de vôo: Dependendo da relação entre a direção das linhas de vôo e as direções preferenciais das feições morfológicas do terreno, estas últimas podem tanto ser realçadas como até mesmo suprimidas. Estudos experimentais (Mac Donald et alii, 1969) demonstram que a detectabilidade de uma feição aumenta à medida que o rumo de visada tende à perpendicularidade em relação a ela. Inversamente, rumos de visada paralelos à direção das feições tendem a suprimi-las. Este fator é de grande importância pois pode levar a

falsas interpretações quando estas são efetuadas sobre imagens obtidas com um único rumo de visada, sobretudo em áreas pobremente conhecidas.

c) **"Foreshortening" e "layover"**: O "foreshortening" de radar é uma distorção presente em todos os sistemas. É a variação na medida de uma mesma declividade, quando esta medida é efetuada sob diferentes ângulos de incidência (Figura 2).

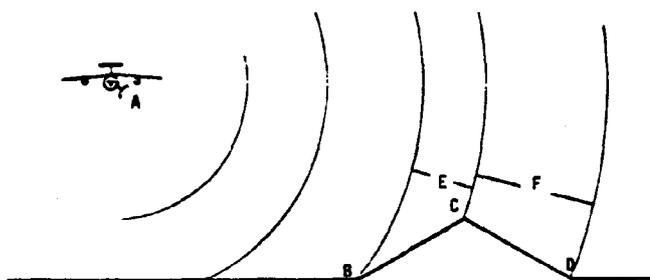


Fig. 2 - "Foreshortening"

Um pulso de radar emitido pela antena A imageia a encosta BC em um espaço de tempo proporcional a distância E. Como as medidas de distância nos sistemas de radar são efetuadas em função do tempo de retorno dos sinais, a encosta BC aparecerá, na imagem, encurtada em relação a encosta CD, embora as duas apresentem altitude e declividades idênticas (Grant & Cluff, 1976).

O efeito denominado "layover" é um caso extremo de "foreshortening" (Figura 3). Um pulso A atinge os pontos B e C ao mesmo tempo, de modo que o tempo do sinal de retorno será o mesmo para os dois pontos. Conseqüentemente B e C serão imageados como um único ponto. Por outro lado, os pontos D e E serão imageados posteriormente a B e C, também como um único ponto. O efeito resultante nas imagens será uma aproximação do topo e um afastamento da encosta, com uma inversão do declive real.

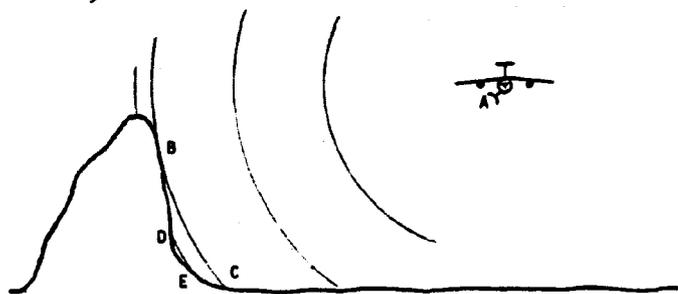


Fig. 3 - "Layover"

Os fenômenos de "foreshortening" e "layover" ocorrem usualmente no "near range" de imagens de radar quando aí existe relevo elevado (Grant & Cluff, op.cit.).

d) **Geometria das imagens**: Os sistemas de radar de visada lateral utilizam dois tipos de apresentação das imagens. No primeiro deles, denominado "ground range" as características geométricas do terreno são mantidas nas imagens, desde que não exista distorção longitudinal, paralela à linha de voo, devida à vari-

ação na velocidade do avião (Figura 4). Este é o tipo da apresentação das imagens obtidas pelo Projeto RADAMBRASIL.

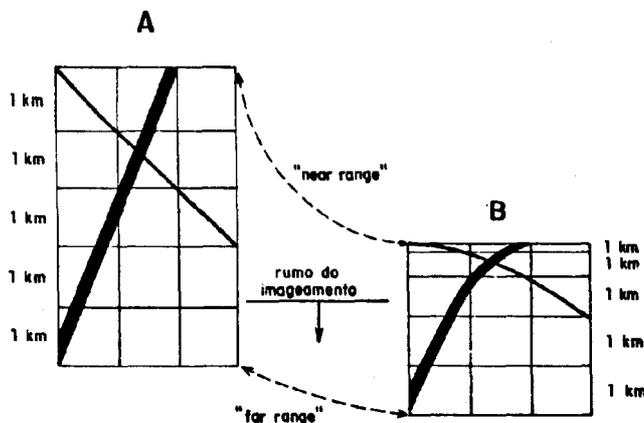


Fig. 4 - Geometria "ground range" (A) e "slant range" (B) em imagens de radar de visada lateral, segundo Mac Donald et alii (1969), p.646 (modificado).

Na segunda forma de apresentação, denominada "slant range" (Figura 4), a geometria das imagens é função direta dos tempos de retorno dos sinais. Desta forma, ocorre um aumento na escala da imagem no sentido do "near range" para o "far range". No "far range" da imagem "slant range" a distância entre dois pontos adjacentes (segundo a direção de visada) varia apenas ligeiramente, ao passo que no "near range" desta mesma imagem ocorre uma grande variação de escala, ocasionando uma compressão das informações. As imagens obtidas pela Missão 96 da NASA seguem esta configuração.

A compressão no "near range" e o efeito conseqüente da mudança na geometria pode ser importante para os geólogos preocupados em identificar formas lineares, que podem ser indicativas de estruturas (Mac Donald et alii, 1969).

Aqui também ficam muito claros os problemas de incorreções que podem advir da interpretação de imagens obtidas segundo uma única direção de voo.

Procurou-se sempre efetuar uma análise integrada entre as imagens do Projeto RADAMBRASIL e Missão 96, visto que podem fornecer informações mutuamente complementares, pelas diferentes características espectrais e geométricas dos imageamentos.

O efeito estereoscópico nas imagens de radar só pôde ser obtido com os "strips" da Missão 96 e, ainda assim, de forma restrita, pois apresentavam variações nas escalas longitudinais.

Os dados resultantes desta etapa foram integrados em um mapa fotogeológico em 1:250 000 que, juntamente com o mapa em 1:500 000, foi analisado em relação aos mapas geológicos disponíveis, em escalas compatíveis. Esta comparação "a posteriori" com os mapas geológicos visou minimizar as possíveis tendências na

fotointerpretação, decorrentes de um conhecimento prévio da geologia da região. Por outro lado, esta ordem favorece o traçado de feições novas, no caso destas estarem presentes.

A análise automática de imagens MSS-LANDSAT foi executada no analisador automático Image-100, utilizando-se as fitas compatíveis com este sistema. Esta etapa foi desenvolvida em áreas escolhidas após a interpretação visual de imagens, quais sejam: Sinclinal da Moeda, Complexo de Bação, Serra do Caraça - Sinclinal Gandarela - Serra das Cambotas.

Nestas áreas foram aplicadas diversas técnicas, sobretudo aquelas de realce, implantadas no sistema Image-100. Estas técnicas são descritas e discutidas por Rowan et alii (1974), General Electric (1975), Paradella & Dutra (1980), Dutra (1980) e Paradella & Vitorello (1981).

Tais técnicas, na seqüência em que foram empregadas são as seguintes:

a) correção geométrica para compensação do efeito do "skewing" (Rowan, et alii, 1974);

b) delimitação da área de interesse;

c) correções radiométricas para a eliminação de ruídos originados pela deficiência de um ou mais sensores, ou correção do desvio lateral de uma ou mais linhas;

d) técnicas de realce para melhorar a capacidade de separação das informações espectrais em análises visuais. Aqui podem ser incluídos os programas "linear stretch" (Rowan et alii, 1974; Paradella & Vitorello, 1981), realce pelos componentes principais (Paradella & Vitorello, op.cit.), filtragens digitais (Dutra, 1980; Paradella & Dutra, 1980) e "band ratio".

A interpretação das fotografias aéreas MS e IR em 1:42 000 da Missão 96 da NASA esteve restrita à porção centro-sul do Complexo Bação, e voltada à separação de unidades fotogeológicas e caracterização estrutural.

Para a região do Complexo Bação, as amostras coletadas durante os trabalhos de campo foram caracterizadas petrograficamente, e, em termos de composições modais, dados estes analisados em conjunto com outros disponíveis na literatura e, em seguida, tratados em diagramas composicionais.

### 3. ANÁLISE DOS DADOS DE SENSORES REMOTOS

#### 3.1. Imagens MSS e RBV - LANDSAT, "strips" de radar da Missão 96 e mosaicos RADAMBRASIL

A integração dos dados obtidos na análise dos produtos acima permitiu, logo de início, uma visualização global da estruturação geral do Quadrilátero Ferrífero. Destacam-se os grandes sinclinais da Moeda, Gandarela, Alegria, Dom Bosco, bem como a Serra do Curral, dispostos ao redor de um núcleo central cor -

respondente ao Complexo de Bação, e ao redor de todo esse conjunto uma grande extensão de rochas granito-gnáissicas e migmatíticas.

Ao nível da análise das imagens MSS-LANDSAT em 1:500 000 alguns aspectos já são dignos de nota.

Na porção nordeste destaca-se um grande lineamento, associado ao Rio Piracicaba que prossegue para nordeste. Seu prolongamento para o interior do Quadrilátero Ferrífero aparentemente condiciona a borda externa do Sinclinal Gandarela. A grande falha do Fundão (Dorr II, 1969) também tem sua terminação no oeste neste lineamento. Na região compreendida entre os meridianos 43°15'W e 42°30'W (aproximadamente), estruturas vizinhas do lineamento são infletidas para oeste, quando posicionadas a norte, e para leste, quando situadas a sul do mesmo, o que sugere uma movimentação dextral ao longo da feição.

Na parte norte, pode ser claramente vista a ligação entre a Serra do Espinhaço e o Quadrilátero Ferrífero. Tal ligação se processa através de extensa e delgada crista de quartzito, encaixada num embasamento granito-gnáissico, com aproximadamente 45 km de extensão, após o que, rumo ao sul, alonga-se para constituir as imponentes formações quartzíticas da Serra das Cambotas. O limite sul desta Serra com rochas do Sinclinal Gandarela parece estar condicionado pelo extenso lineamento do Rio Piracicaba acima descrito.

O Sinclinal Gandarela, que a sul da Serra das Cambotas alinha-se estruturalmente segundo NE, interpõe-se entre esta serra e a do Caraça onde volta a manifestar-se um nítido arranjo N-S das rochas, concordantemente com as serras do Espinhaço e das Cambotas.

Na Serra do Caraça o padrão submeridiano é ditado por sistemas de falhamentos inversos, similares àqueles do Espinhaço, conferindo à região um aspecto escamado. Nas vizinhanças a oeste desta serra, faz-se presente um padrão de fraturamentos semelhante a uma megabrecha onde predominam as direções N-S. E-W e WNW-ESE. A estes associam-se possantes intrusões básicas.

A sul, temos o Sinclinal Dom Bosco, cuja interpretação está prejudicada pelas linhas de varredura do MSS-LANDSAT, paralelas a direção das estruturas. Entretanto, a sul desta feição, destaca-se o grande contraforte quartzítico representado pela Serra do Ouro Branco, alongada segundo E-W. Apresenta esta serra textura bastante semelhante ao Espinhaço, Cambotas e Caraça. O limite norte desta serra é bem definido por um grande lineamento, que prolonga-se segundo E-W para a parte oriental e inflete-se para SW rumo à porção ocidental da área. É representado no terreno pela importante Falha do Fundão.

Na parte oeste encontra-se a magnífica

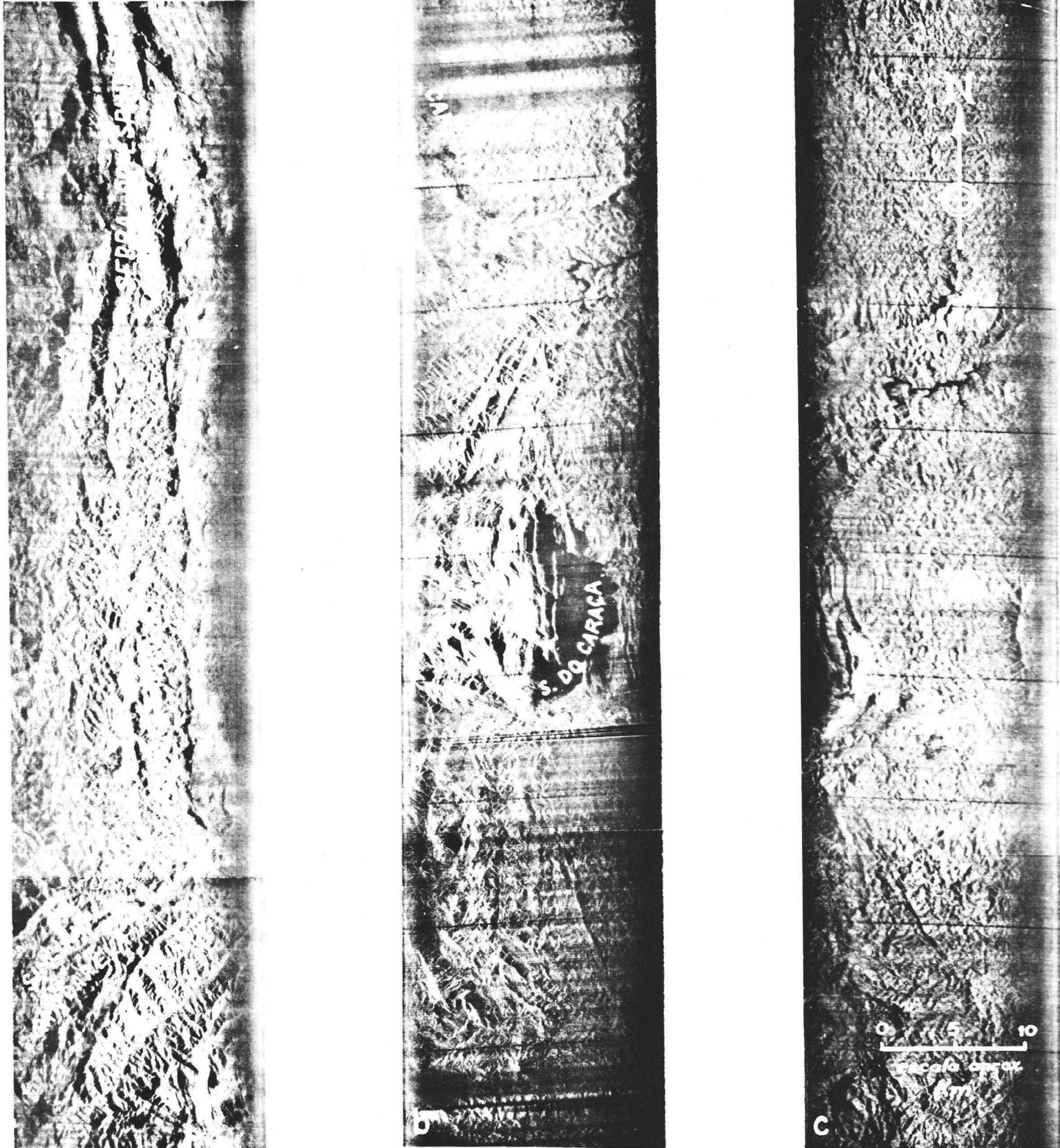


Fig. 5 - Três "strips" adjacentes de radar de visada lateral da Missão 96 da NASA, correspondentes à porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Em a pode ser bem visualizada a ligação entre as serras do Espinhaço e Cambotas. Os "strips" b e c ilustram o problema do mascaramento pelo efeito de sombreamento. Para uma completa delimitação da Serra do Caraca é necessária a análise integrada das imagens b e c.

estrutura representada pelo Sinclinal da Moeda. Para esta estrutura, a possibilidade de interpretação das imagens utilizando-se o efeito estereoscópico obtido por diferença de paralaxe aumentou a capacidade de detecção de estruturas e também a precisão na delimitação das mesmas. No interior da estrutura, a existência do efeito estereoscópico possibilitou a definição de prováveis traços de camadas e seus rumos de mergulho. Na borda oeste deste sinclinal encontra-se a serra homônima sustentada por itabiritos e quartzitos, deslocada em alguns pontos por falhamentos aparentemente transcorrentes. A discordância estrutural entre as rochas da Serra da Moeda e o embasamento a oeste é bastante nítida, como também na junção deste sinclinal com a Serra do Curral, a norte. Esta última, procedente de sudeste, corta retilineamente a região rumo a nordeste.

Continuando esta descrição da região, e seguindo o sentido dos ponteiros de um relógio, temos, na porção compreendida entre a terminação nordeste da Serra do Curral, com traço ocidental da Serra das Cambotas e borda noroeste do Sinclinal Gandarela, o denominado Complexo Caeté, de forma aproximadamente circular, e natureza gnáissico-migmatítica.

Finalmente, na porção central do Quadrilátero Ferrífero encontra-se a imponente massa granito-gnáissica-migmatítica do Complexo de Bação. Apresenta forma nitidamente ovalada, com eixo maior alongado segundo E-W. Seus contatos são bem definidos nas porções oeste, sul e leste, tornando-se difuso no flanco norte.

Internamente ao complexo, podem ser observadas algumas feições circulares, especialmente aquelas situadas nas suas porções sudoeste e centro-sul. Na porção centro-sul, na área de ocorrência de rochas pertencentes ao que Herz (1970) denominou Granodiorito Engenheiro Correia, temos a mais imponente destas feições. É delimitada por uma sucessão de cristas e vales encurvados conferindo à estrutura um nítido aspecto anelar, aliado a uma tonalidade mais escura. Lineamentos, alguns de grande porte, também estão presentes neste complexo, afetando não apenas este como também as unidades circunvizinhas.

Ao nível da análise das imagens em escala 1:250 000 (MSS e RBV - LANDSAT e mosaicos RADAMBRASIL) e "strips" de radar em escala 1:360 000 (Missão 96 da NASA), a delimitação das feições estruturais sofreu notável incremento.

A ligação Espinhaço-Quadrilátero é particularmente notável no mosaico de radar RADAMBRASIL e nos "strips" de radar da Missão 96 da NASA. A direção submeridiana das linhas de vôo, associada a diferentes rumos de imageamento proporcionou uma boa definição das estruturas da região (Figuras 5a e 5b).

A persistência do estilo estrutural entre rochas das serras do Espinhaço, Cambotas e Caraça é também notável quando observada nos produtos obtidos por radares de visada lateral. No caso da Serra do Caraça, as figuras 5b, 5c e 6 ilustram muito bem o problema de incorreções que podem advir do exame de imagem de radar obtidos segundo um único rumo de imageamento. Verifica-se na Figura 6 a definição completa do contorno da Serra do Caraça, ao passo que se faz necessário uma combinação das imagens 5b e 5c para se observar o traçado completo da serra, mascarada parcialmente, em cada uma das imagens pelo efeito de sombreamento do radar.

O lineamento ao longo do Rio Piracicaba está também muito bem definido no mosaico RADAMBRASIL. Pela sua orientação favorável em relação as linhas de vôo do radar, as estruturas defletidas associadas a este lineamento estão particularmente ressaltadas no mosaico.

A interpretação das imagens na região do Sinclinal Dom Bosco apresentou apenas pequeno progresso com o emprego dos novos produtos (radar) e a escala maior das imagens LANDSAT (MSS e, em parte RBV). A orientação desta estrutura, paralelamente à direção de visada dos sistemas de radar diminui consideravelmente a detectabilidade de feições internas à mesma. Na Serra do Ouro Branco, extenso lineamento cor-tando integralmente esta serra pode ser visualizado nas imagens MSS e RBV - LANDSAT e mosaico RADAMBRASIL. Orienta-se aproximadamente segundo WNW-ESE, tendo sido realçado principalmente por sua característica tonal (mais escura) diferente das rochas quartzíticas vizinhas (mais clara). O mapa geológico de Dorr II (1969) indica que este lineamento constitui-se de um grande dique de diabásio.

Para o Sinclinal da Moeda, a utilização do efeito estereoscópico, aliado à nova escala das imagens MSS-LANDSAT, bem como a disponibilidade de imagens RBV, confirmam integralmente os resultados obtidos com as imagens em escala inferior. A movimentação relativa de alguns falhamentos transcorrentes pode ser precisada (Figura 7), não só para a borda oeste (Serra da Moeda), mas também na borda leste (Serra de Itabirito) onde afetam também rochas do Supergrupo Rio das Velhas e do Complexo de Bação. A contribuição oferecida pelo mosaico RADAMBRASIL é pequena, pois o fenômeno de "layover" está presente na borda ocidental do sinclinal. "Strips" da NASA não são disponíveis para a região.

Embora as imagens de radar não tenham oferecido um volume significativo de novas informações, as imagens MSS-LANDSAT em 1:250 000 proporcionaram uma considerável melhoria na interpretação das estruturas da região do Complexo de Bação. As feições circulares anteriormente delimitadas puderam ser melhor definidas (Figuras 8a e 8b), sobretudo aquela da porção centro-sul do complexo. Alguns lineamentos de grande porte foram identificados e interpretados como possíveis falhamentos. Outros menores, são



Fig. 6 - Parte da cena MSS-LANDSAT no canal 7, órbita 136, ponto 26 (SRB), de 15 de agosto de 1973, correspondente à região das serras das Cambotas, Caraça e Sinclinal Gandarela.

provavelmente representativos dos traços de foliação das rochas.

### 3.2. Análise automática de imagens MSS-LANDSAT

A análise automática de imagens MSS - LANDSAT foi conduzida para as regiões do Sinclinal da Moeda, Complexo de Bação e Serra do Caraça-Sinclinal Gandarela - Serra das Cambotas.

a) Sinclinal da Moeda: para esta região foram aplicadas as técnicas de "linear stretch" (contrast stretch) e filtragem digital de imagens.

Na porção norte da estrutura foram confeccionadas composições coloridas dos canais 5 e 7, ambos com "contrast stretch" bem como dos canais 4, 5 e 7, todos processados. Além disso, o filtro isotrópico do tipo 3 (Figura 9), com parâmetros (A=1, B=2, C=30, D=-2) foi aplicado no canal 5, precedido por um "linear stretch" da cena. Na parte sul do sinclinal o produto obtido foi uma composição colorida dos canais 5 e 7, ambos com "linear stretch". Além dessas também foi testada a técnica de razão entre canais, sem bons resultados.

A técnica do "linear stretch" proporcionou uma melhoria no contraste da cena, facilitando sobretudo a delimitação das unidades fotogeológicas. Os filtros digitais por sua vez destacaram muito bem os falhamentos anteriormente identificados. A combinação destas técnicas gerou produtos onde a delimitação estrutural ficou evidentemente facilitada em relação às imagens no estado original.

b) Complexo de Bação: várias foram as técnicas de realce utilizadas na análise desta região. A figura 10 sumariza a seqüência de processamentos utilizados e os produtos obtidos.

Para o realce pelos principais componentes utilizou-se o programa PRINCO, cujos parâmetros estão reproduzidos na Tabela 1.

TABELA 1

#### PRINCIPAIS COMPONENTES - PARÂMETROS PRINCO

MATRIZ DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO				
41.000	0.690	0.352	0.109	
50.690	1.000	0.317	0.060	
60.352	0.317	1.000	0.780	
70.109	0.060	0.780	1.000	
MATRIZ DE COVARIÂNCIA ( $\sigma_s^2 = 506.485$ )				
23.533	26.069	12.818	10.108	
26.069	60.688	18.547	8.890	
12.818	18.547	56.371	112.036	
10.108	8.890	112.036	365.893	
MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO				
1 AUTO-VETOR	0.039	0.044	0.310	0.949
2 AUTO-VETOR	-0.439	-0.850	-0.255	0.141
3 AUTO-VETOR	0.084	-0.356	0.888	-0.277
4 AUTO-VETOR	0.894	-0.386	-0.223	0.054
AUTOVALORES		% DE INFORMAÇÃO		
	403.346		79.6 1º CP	
	78.239		15.4 2º CP	
	15.190		3.0 3º CP	
	9.709		1.9 4º CP	
	506.484			

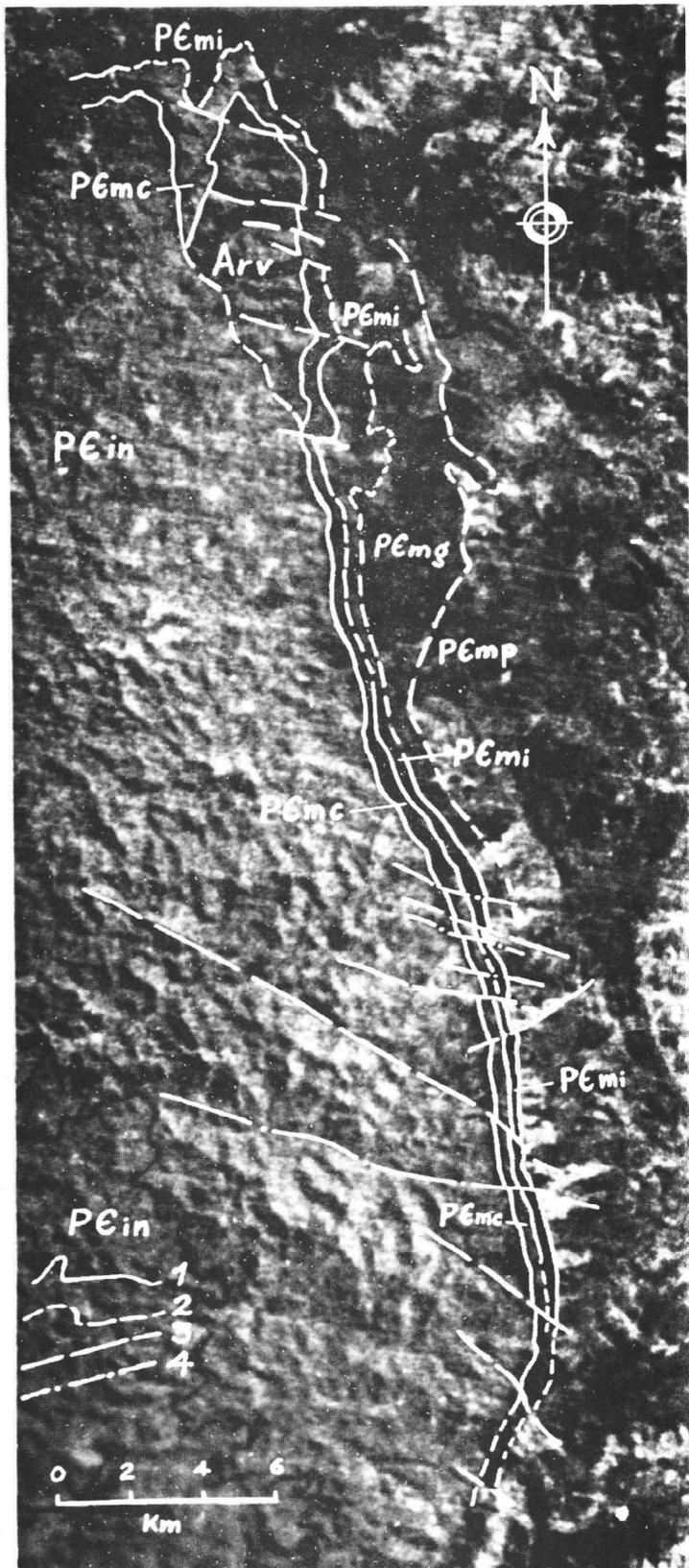


Fig. 7 - Parte da cena MSS-LANDSAT, canal 7, correspondente ao flanco oeste do Sinclinal da Moeda (Serra da Moeda). Rochas arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas (Arv). Rochas proterozóicas do Supergrupo Minas: Grupo Caraça (PÊmc); Grupo Itabira, formações Cauê (PÊmi) e Gandarela (PÊmg); Grupo Piracicaba (PÊmp); Rochas granito-gnáissicas - migmatíticas não diferenciadas (PÊin). 1-contatos fotogeológicos; 2-contatos fotogeológicos aproximados; 3- falhas

já mapeadas; 4- falhas não mapeadas.

Nota-se que 95% das informações espectrais contidas nos 4 canais do MSS-LANDSAT estão "concentradas" nas duas primeiras componentes principais. A primeira componente principal (Figura 11) onde está concentrada 79,6% das informações, corresponde às características do brilho total contido nos quatro canais, relacionados principalmente à morfologia do terreno. A segunda componente principal (Figura 12) apresenta 15,4% das informações relacionadas principalmente ao contraste espectral das imagens. As demais componentes apresentam pequenas quantidades de informação, concentrando-se aí o ruído das imagens (quarta componente principal).

A maior parte dos produtos obtidos para a região do Complexo Bação mostrou uma melhoria no realce das estruturas internas, favorecendo sua delimitação. Os melhores resultados foram obtidos aplicando-se o "linear stretch" e, em seguida o filtro do tipo 3 no canal 7 da imagem LANDSAT. A estrutura circular da região de Engenheiro Correia foi particularmente bem realçada, notando-se inclusive a presença de um lineamento cortando diametralmente a feição - com pequeno deslocamento de cristas constituintes da mesma - provavelmente um falhamento transcorrente sinistral. A figura 13 mostra esta feição. Embora esteja representado no mapa da figura 8b, sua verificação na imagem MSS-LANDSAT só foi possível após a sua identificação nos produtos processados automaticamente.

Pelas suas características morfológicas, a estrutura de Engenheiro Correia é bem clara na imagem correspondente à primeira componente principal (Figura 11), tendo pouca expressão na segunda componente (Figura 12), onde apenas o seu núcleo apresenta certo contraste espectral. Por outro lado, na segunda componente principal merece destaque a feição ovalada realçada na porção centro noroeste da imagem, já assinalada na figura 8b.

c) Serra do Caraça - Sinclinal Gandarela - Serra das Cambotas: para esta região foram aplicadas as técnicas de "linear stretch" e filtragem digital. Os produtos obtidos para a Serra do Caraça correspondem aos canais 5 e 7 com "stretch", bem como uma composição colorida entre os mesmos, além do canal 7 com filtro 3 e parâmetros (A=1, B=-2, C=28, D=-2). Na junção Cambotas - Gandarela os produtos obtidos referem-se ao canal 7 com "linear stretch" e filtro 3 com os mesmos parâmetros empregados na área do Caraça, além de uma composição colorida entre os canais 5 e 7 ambos com "stretch" e o filtro aqui mencionado.

Para a região da Serra do Caraça - Sinclinal da Alegria, o "linear stretch" mostrou-se a técnica mais adequada, com grande definição das estruturas, como os falhamentos na Serra do Caraça e os lineamentos a oeste da serra, associados aos diques de diabásio, cujas extensões mostraram-se maiores que as definidas an



Fig. 8a - Parte da cena MSS LANDSAT, canal 7, correspondente à região do Complexo Bação.

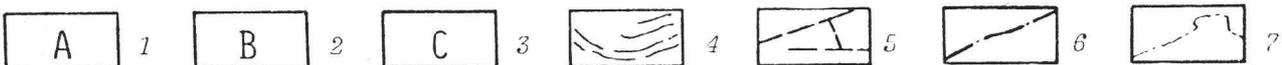
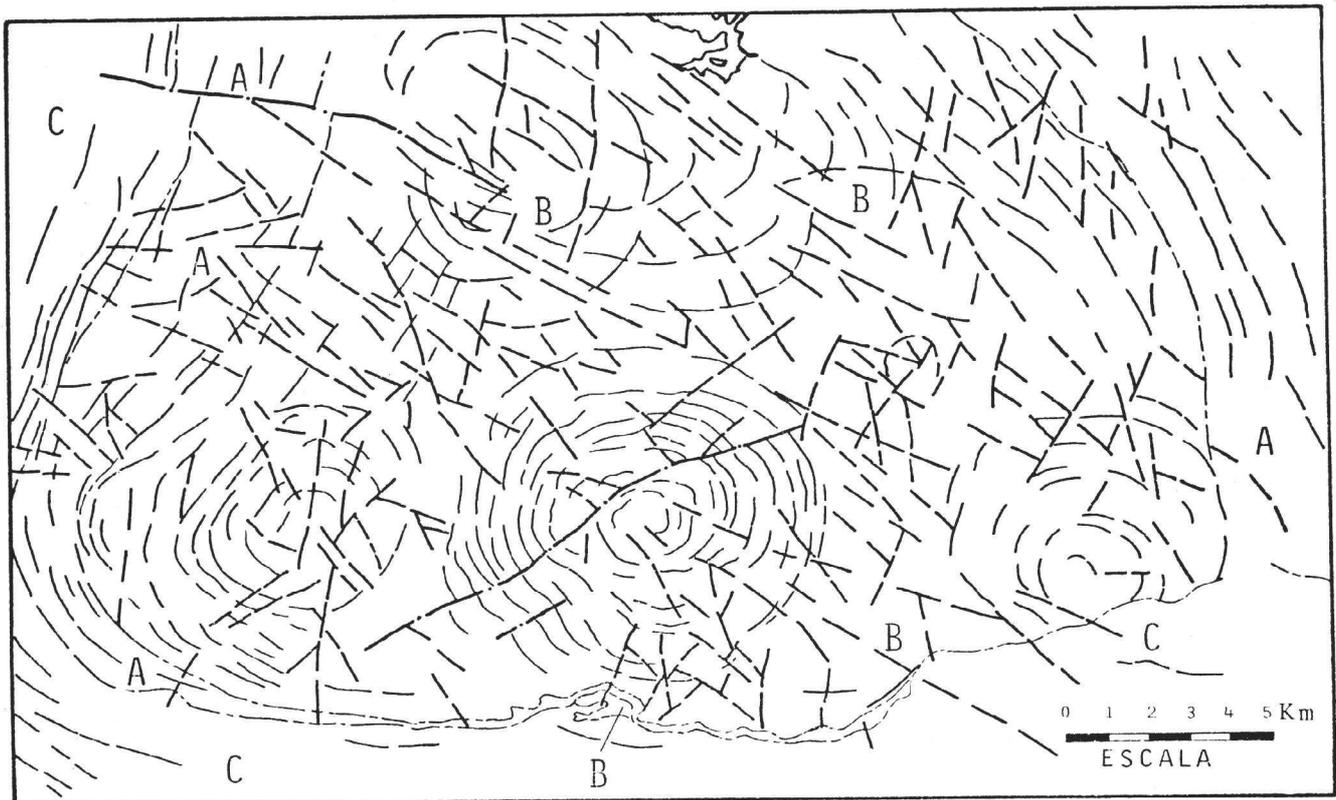


Fig. 8b - Resultado da fotointerpretação da imagem da figura anterior. Legenda: 1, 2, 3 - unidades fotogeológicas; 4 - prováveis traços de foliação; 5 - prováveis fraturas; 6 - prováveis falhas; 7 - contatos fotogeológicos.

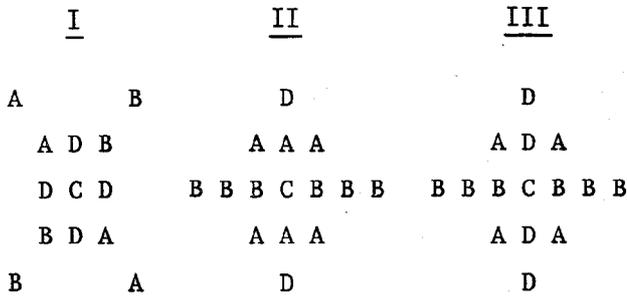


Fig. 9 - Configuração dos filtros digitais implantados no sistema Image-100.

teriormente. Embora mostrando uma tendência à saturação da imagem, a filtragem digital proporcionou um bom realce de lineamentos N-S, alguns dos quais apenas aqui identificados.

Os produtos obtidos para a região Cambotas-Gandarela evidenciaram claramente o limite entre as mesmas e a grande discordância entre seus estilos estruturais. Favoreceu também a delimitação das diferentes unidades ali presentes.

### 3.3. Fotografias aéreas da Missão 96 (NASA)

A utilização de fotografias aéreas da Missão 96 restringiu-se unicamente à região da estrutura circular de Engenheiro Correia.

Foi dada preferência para as fotografias Ektachrome IR Aerographic, tendo sido analisadas também as fotos Ektachrome MS Aerographic. Estas últimas inclusive foram utilizadas para completar o recobrimento da área, pois algumas fotos infravermelhas extraviaram-se.

A interpretação destas fotografias aéreas proporcionou a elaboração de um mapa fotogeológico, utilizado como base para os trabalhos de campo na região. Ficou, nesta análise, bastante evidenciada a associação morfológica da feição.

### 4. INTEGRAÇÃO DOS DADOS COM MAPAS E TRABALHOS PRÉVIOS

Os resultados das interpretações dos produtos de sensores remotos foram analisados à luz do vasto material bibliográfico existente sobre a região. Como principais informações tem-se:

a) o lineamento ao longo do Rio Piracicaba não está presente nos mapas e trabalhos disponíveis. Entretanto, de significativo tem-se o trabalho de Amaral et alii (1976) que assinalam a presença de uma "zona de falha" acompanhando os rios Piracicaba e Doce, sem contudo estabelecer o traçado desta feição.

b) a continuidade entre as rochas da Serra do Espinhaço e Quadrilátero Ferrífero pela

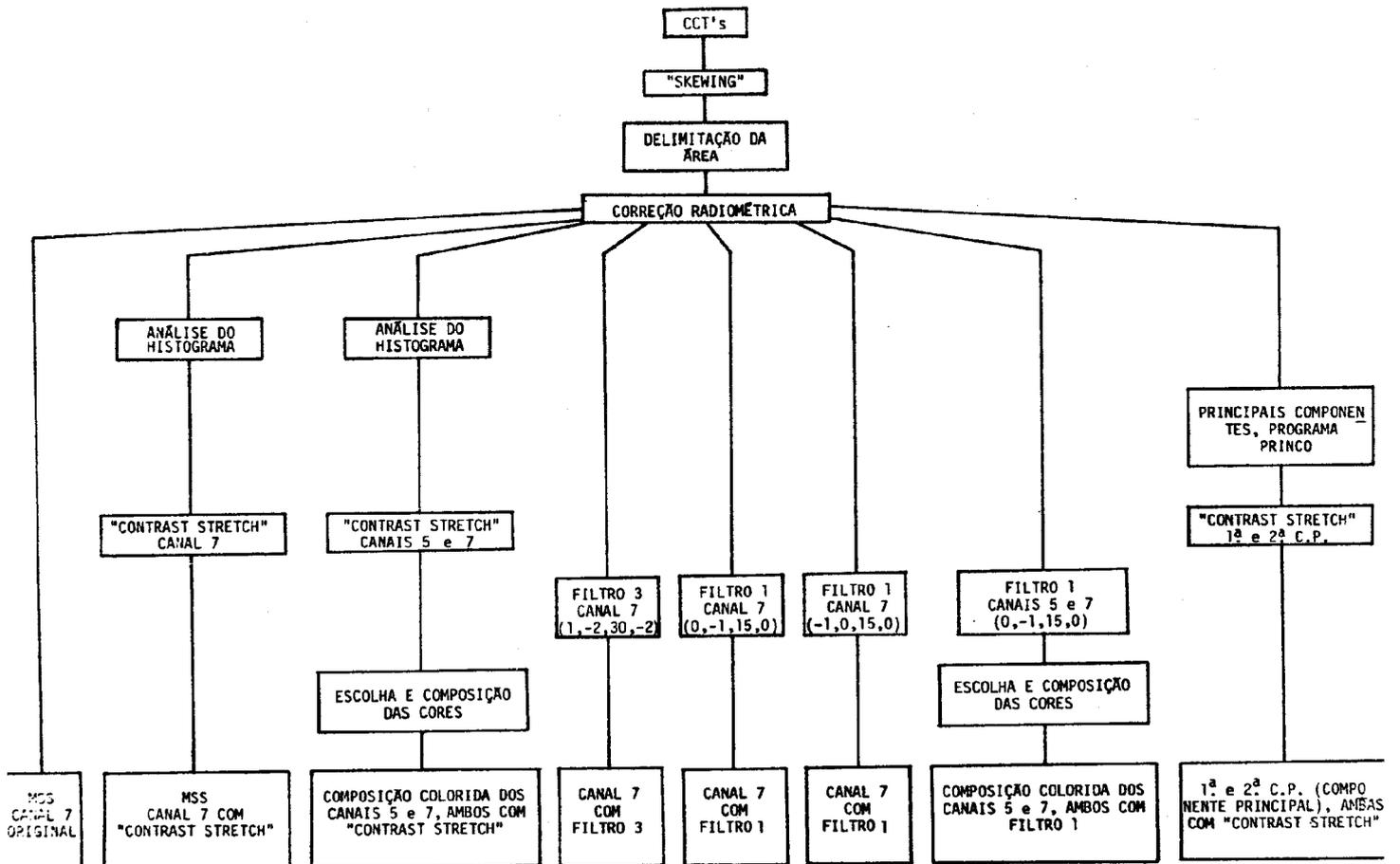


Fig. 10 - Diagrama mostrando a seqüência de etapas envolvidas no processamento das fitas compatíveis com o analisador Image-100 e os produtos obtidos para a região do Complexo de Bação (segundo Riccomini, 1982).

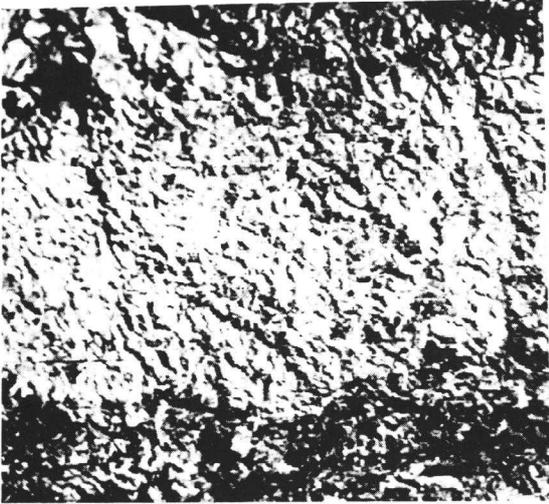


Fig. 11 - Realce pelas principais componentes. Primeira Componente Principal.

Serra das Cambotas é também mencionada no trabalho de Amaral et alii (op.cit.), que indicam a presença de um extenso falhamento de empurrão, limitando a borda oeste e sul da unidade quartzítica;

c) a extensão de alguns lineamentos delimitados na região imediatamente a leste da Serra do Caraça é maior que a assinalada nos mapas geológicos da região (Moore, 1969; Maxwell, 1972; Dorr II, 1969). Alguns destes lineamentos não estão assinalados nos mapas existentes;

d) no Sinclinal da Moeda, alguns dos falhamentos interpretados truncando o seu flanco oeste (Serra da Moeda) não foram assinalados nos mapas geológicos (Guild, 1959; Pomerehne, 1964; Wallace, 1965);

e) Nenhuma feição estrutural importante foi mapeada na parte interna do Complexo Baçã, mesmo nos mapas geológicos em 1:25 000 (Guild, op.cit.; Johnson, 1962; Wallace, op.cit.; Dorr II, op.cit.). Apenas Herz et alii (1961) delimitam, na porção centro-sul do complexo um corpo granodiorítico, o de Engenheiro Correia, sem qualquer menção à sua estrutura interna.

## 5. TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram executados em áreas selecionadas, de modo a se caracterizar as feições delimitadas por fotointerpretação e análise automática, que não encontraram durante a integração com mapas e dados bibliográficos informações suficientes para serem elucidadas.

### 5.1. Serra do Caraça - Sinclinal Gandarela - Serra das Cambotas

A investigação de campo na região oeste da Serra do Caraça permitiu que se verificasse a continuidade dos lineamentos ali delineados, além dos limites estabelecidos nos mapas geológicos disponíveis. Nos casos verificados foram encontrados diques de rochas básicas as

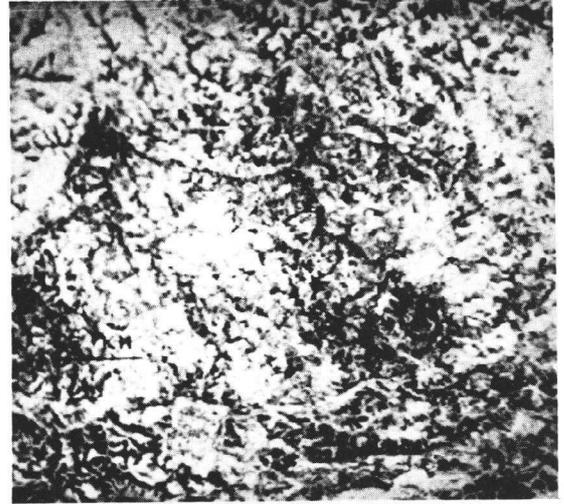


Fig. 12 - Realce pelas principais componentes. Segunda Componente Principal.

sociadas a estes lineamentos, cuja extensão original é, em alguns casos, realmente maior que os anteriormente mapeados.

Para a junção Cambotas - Gandarela, não foi possível estabelecer no campo, ao nível de detalhe com que os trabalhos foram conduzidos, a relação entre as estruturas de ambas as unidades, nem tampouco a relação entre a Falha do Fundão e o lineamento ao longo do Rio Piracicaba.

Cortando-se a Serra das Cambotas no rumo de leste para oeste, pela estrada Barão de Cocais - Caeté, pode ser vista a intensa tectônica sofrida pelos quartzitos desta área, que também pode ser percebida na estreita faixa de rochas atribuídas ao Supergrupo Rio das Velhas situado no flanco oeste da serra.

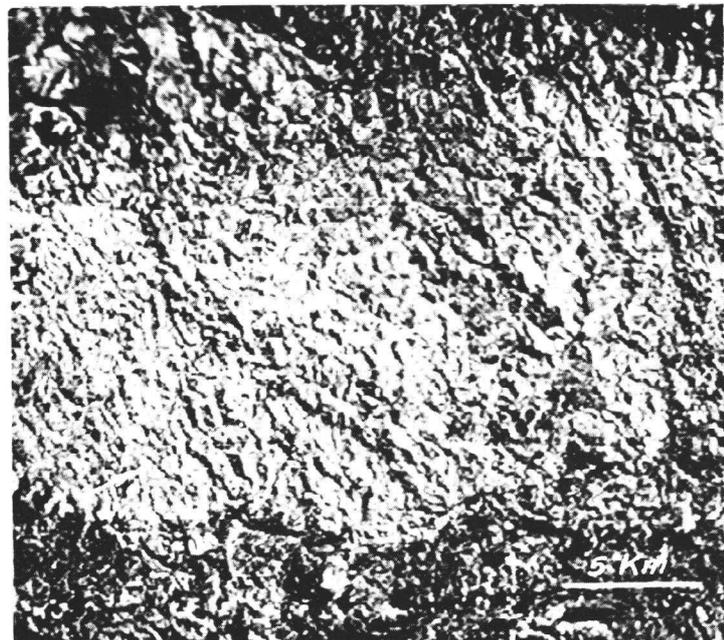


Fig. 13 - Parte da cena da figura 8a, realçada no Image-100 através de filtragem digital (filtro 3 com parâmetros A=1, B=-2, C=30, D=-2). Notar o lineamento indicado pelas setas cortando a estrutura de Engenheiro Correia.

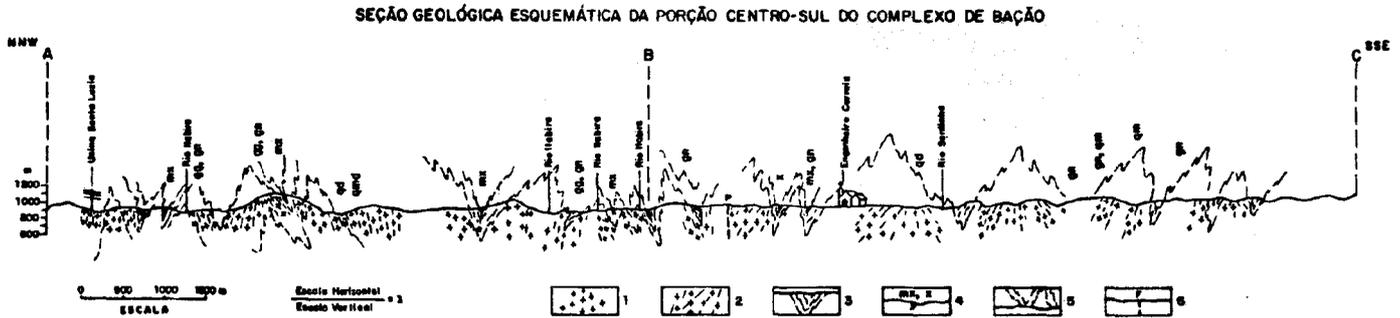


Fig. 14 - Seção geológica esquemática da porção centro-sul do Complexo de Bação. 1 - rochas com textura homogênea; 2 - rochas com foliação incipiente a moderada; 3 - rochas com textura gnáissica; 4 - xistos e micaxistos sob a forma de "roof pendants"; 5 - reconstrução (hipotética) das principais estruturas antiformais e sinformais; 6 - provável falha. Composição das rochas: gg - granítica; gn - granodiorítica; qm - quartzo-monzonítica; qmd - quartzo-monzodiorítica; qd - quartzo-diorítica; x - xistos; mx - mica xistos (predominantemente biotita-xistos). (Riccomini, 1982).

## 5.2. Sinclinal da Moeda

Os trabalhos de campo nessa região permitiram a caracterização de alguns falhamentos interpretados que não apresentavam correspondência nos mapas disponíveis. Os traços de camadas e suas atitudes, interpretados em imagens MSS-LANDSAT, apresentam total concordância com medidas no campo.

A estrada que corta a Serra da Moeda, rumo à cidade igualmente denominada Moeda, foi levantada em detalhe, mostrando a validade dos critérios empregados em fotointerpretação para a separação das unidades do Supergrupo Minas. A região do contato entre este Supergrupo e rochas granito-gnáissicas foi observado cuidadosamente, mostrando ser do tipo concordante.

## 5.3. Complexo de Bação

No interior do Complexo de Bação, levantamento de campo foi conduzido na sua porção centro-sudeste. Dentre as feições circulares ali presentes, a única que mostrou concordância com os dados obtidos por fotointerpretação foi a de Engenheiro Correia. Foram levantadas algumas seções geológico-estruturais detalhadas acompanhadas de uma coleta sistemática de amostras para petrografia.

## 6. PRINCIPAIS RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Complexo de Bação

Os trabalhos desenvolvidos nesta região, incluindo duas etapas, permitiram a caracterização de uma grande estrutura circular na região de Engenheiro Correia. A primeira etapa, cujos resultados preliminares foram anteriormente reportados por Riccomini & Amaral (1980), já mostrava boa indicação da presença desta estrutura.

No mapeamento levado à cabo na região, procurou-se reconstituir os dobramentos com base na foliação presente nas rochas. Estas constituem-se principalmente em gnáisses (migmatitos) com textura homogênea, foliação incipiente a moderada, ou gnáisses típicos, xistos, micaxistos, e, mais restritamente, anfíbolitos.

As rochas mais homogêneas, de aspecto granítico, foram interpretadas como sendo de um nível estrutural mais profundo, e situadas em núcleos antiformais. Rochas de nível estrutural cada vez menos profundo corresponderiam seqüencialmente aos gnáisses levemente foliados e gnáisses típicos, estes últimos provavelmente posicionados em calhas sinformais. Também as ocorrências de rochas xistosas ("roof pendants") estariam nesta última situação.

As seções elaboradas nestes princípios, como por exemplo aquela da figura 14, mostram nítida associação relevo/estrutura. Núcleos antiformais geralmente refletem-se em superfície como formais mais elevadas (provavelmente em virtude da homogeneidade das rochas ali contidas), ao passo que às rochas mais foliadas e xistosas associam-se relevos mais baixos, locais preferenciais para o entalhe da rede de drenagem. Por outro lado, as seções indicam um encurvamento dos eixos destas estruturas antiformais e sinformais.

Assim, pôde ser interpretado o quadro estrutural local, com base em critérios geológicos e morfológicos. A estrutura constituiria um grande domo, sendo que os núcleos antiformais corresponderiam às feições elevadas curvilíneas, e as sinformais teriam correspondência nos vales igualmente encurvados (Figura 8b). Tal situação é também possível de ser delineada com base nas atitudes estruturais tomadas no campo aliadas àquelas dos mapas disponíveis.

Em termos macroscópicos, como já foi dito, as rochas aqui presentes são predominantemente granitóides e gnáisses (migmatitos) e, subordinadamente, xistos e micaxistos (predominantemente biotita-xistos). Sete amostras dos granitóides e gnáisses do interior da estrutura de Engenheiro Correia foram laminadas para caracterização petrográfica e, em termos de composições modais. Composicionalmente, variam de grã

nitos a quartzo-dioritos, com termos intermedíarios granodioríticos, quartzo-monzoníticos e quartzo-monzodioríticos. A integração destas análises com aquelas da literatura sobre a região do complexo como um todo (Guild, 1957; Johnson, 1962; Guimarães et alii, 1967; Herz, 1970) - cerca de 30 - em diagramas QAP de Streckheisen (1973), permite a definição de quatro campos distintos de composição das rochas (Riccomini, 1982).

Em termos da porção do Complexo de Bação que nos interessa, as análises modais indicam um campo de composição que abrange granitos, granodioritos, quartzo - monzonitos, quartzo-monzodioritos e quartzo-dioritos, para as rochas situadas na parte interna da estrutura de Engenheiro Correia. Para a porção externa à estrutura, o que Herz (1970) denominou Granito Gnaiss Itabirito, a composição das rochas restringe-se principalmente ao campo do granodiorito, com pequenas variações para granito, tonalito e granitoides ricos em quartzo. Além disso, este segundo campo apresenta maior porcentagem de quartzo e principalmente biotita, podendo esta chegar, e até mesmo ultrapassar os dez por cento do volume da rocha.

Dessa forma, também em termos composicionais a estrutura de Engenheiro Correia é distinta das porções vizinhas. Pelas interpretações de Herz (1970), podemos considerar esta feição associada à intrusão, em tempos arqueanos, de rochas por ele tidas como granodioríticas (embora nessas análises mostrem um campo de variação maior) em metassedimentos e metavulcânicas do Supergrupo Rio das Velhas, na porção centro-sul do Complexo de Bação. À partir dessa região, os efeitos da intrusão foram decrescendo, gradando para as rochas Rio das Velhas.

Geologicamente, a situação do Complexo de Bação apresenta similaridades com outras partes do mundo, como por exemplo, os terrenos arqueanos russos, do Canadá, da Rodésia. Em particular para este último local, a semelhança já havia sido destacada por Dorr II (1969, p. A94). O arranjo estrutural local mostra grande concordância com os modelos dos domos gnáissicos propostos por Salop (1972). O Complexo de Bação corresponderia a uma estrutura do tipo "mantled gneiss dome" e a estrutura de Engenheiro Correia a um domo gnáissico na concepção deste tectonista russo. É possível que outras estruturas semelhantes estejam presentes nos terrenos granito-gnáissicos das vizinhanças do Quadrilátero Ferrífero, como o Domo de Bonfim (Herz, 1970) e o Complexo de Caeté. O arranjo mais amplo destas estruturas poderia então corresponder a uma oval gnáissica dobrada no sentido de Salop (op.cit.) e Khain (1973, p.370).

## 6.2. Sinclinal da Moeda

Como já foi dito em 5.2 foram caracterizados alguns falhamentos transcorrentes sec-

cionando o flanco ocidental do sinclinal. Toda via, outro aspecto igualmente interessante é relativo à interface entre as rochas do Supergrupo Minas (Formação Moeda) e rochas gnáissicas, neste mesmo flanco.

Com respeito a este contato, Wallace (1965) estudando a região o descreve como gradacional. Outros geólogos da equipe DNP-MSGS consideram que na superfície de contato existe um rególito pré-Minas (Wallace, op.cit., p.F24).

Observações dessa zona de contato indicam que o mesmo é concordante. Tem-se na base da Formação Moeda um quartzito conglomerático que se torna cada vez mais feldspático, passando para um paragnaisse com o incremento em biotita. Na transição podem ser observadas estreitas faixas de rochas essencialmente quartzosas, de aspecto milonítico, orientando-se paralelamente ao flanco da serra, com mergulhos subverticais. Cristais de quartzo azul se fazem presentes no quartzito conglomerático, zona de transição e paragnaisse, que se mantém estruturalmente paralelo ao quartzito. Esta última litologia, denominada "granito-gnaiss" por Wallace (op.cit.) ocupa uma faixa paralela ao Quartzito Caraça, variando sua largura entre 0,4 e 2 km. Tem seus limites assinalados no mapa de Herz (1970). A oeste desta faixa, com contatos não muito bem definíveis - apenas em alguns lugares lentes de quartzito de espessuras até decamétricas situam-se neste contato - ocorrem granodioritos porfiríticos, de aspecto ígneo intrusivo.

Por outro lado, o mapa de zonas metamórficas elaborado por Herz (1978) indica uma estreita e alongada faixa de ocorrência de cianita alojada ao longo da Serra da Moeda. Curiosamente, neste mesmo mapa outras áreas de ocorrência extensa de cianita estão associadas à presença de falhamentos inversos ou de empurrão.

Considerando-se ainda um outro aspecto, relativo à ocorrência de uma "seqüência de paragnaises" na base do Supergrupo Minas no Distrito de Itabira sem discordâncias com o supergrupo, mas em contato tectônico com rochas granito-gnáissicas (Schorscher, 1976), algumas especulações podem ser feitas acerca do contato entre rochas do Supergrupo Minas e aquelas situadas a oeste na Serra da Moeda.

Pode-se supor que os paragnaises transicionais para os quartzitos sejam equivalentes à "seqüência de paragnaises" da região de Itabira, fazendo portanto parte do Supergrupo Minas. Os granodioritos porfiríticos podem tanto serem intrusivos nesta seqüência Minas ou ter seu contato de alguma outra natureza, inclusive tectônica. A hipótese de que os paragnaises podem constituir a base do Minas, a oeste do Sinclinal Moeda encontra suporte na passagem transicional para os quartzitos, e na presença de quartzo azul em toda esta seqüência "basal". Este último fator faz supor que estes cristais de quartzo são anteriores a uma gnaissificação dessas rochas, fenômeno este o

corrido apenas na parte da seqüência sujeita a condições mais enérgicas. Por outro lado, a existência de falhamentos inversos ou de empurrão nesta região não deve ser hipótese descartada. A presença abundante de cianita nos metassedimentos indica a existência de condições de "stress". Por outro lado, este mineral se desenvolve desde que hajam componentes aluminosos nessas rochas. Assim, poderiam também ter se desenvolvido na seqüência de paragneisses caso houvessem condições para tal. Esse quadro sugere que caso existam falhamentos na região, estes devem estar alojados nas unidades do Minas típico (Caraça para cima) da Serra da Moeda (no flanco W), ou se constituírem na interface entre os paragneisses e os granodioritos porfiríticos.

A importância desse quadro estrutural com possíveis falhamentos de empurrão e presença de falhamentos transcorrentes, estes últimos cortando a Serra da Moeda, é ligada à presença de veios de quartzo associados a estas estruturas, normalmente favoráveis como alvos de prospecção aurífera na região.

### 6.3. Serra das Cambotas - Sinclinal Gandarela - Serra do Caraça

A interpretação das imagens mostra que a associação estrutural entre o extenso Falhamento do Fundão e o Lineamento do Rio Piracicaba define uma grande estrutura em forma de cunha na porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Teria a forma de um "V" deitado, com a abertura para leste. A parte frontal da estrutura seria o Falhamento do Fundão. A parte norte estaria condicionada pelo Lineamento do Rio Piracicaba e a parte sul pela extensão para sudeste do Falhamento do Fundão. Os flancos norte e sul apresentam um ângulo de aproximadamente 80° entre si, e na sua bissetriz, orientada aproximadamente segundo E-W, estão localizados o campo de diques de diabásio da borda oeste da Serra do Caraça, além desta última.

A movimentação desta cunha é de leste para oeste, com componente transcorrente no flanco norte e de empurrão na parte frontal e para sudeste. Na bissetriz, os falhamentos de empurrão da Serra do Caraça (com direções submeridianas e mergulhos para leste) indicam terem sido originados por esforços de leste para oeste, cujas direções são paralelas à bissetriz da cunha.

### 7. CONCLUSÕES

A análise integrada dos produtos de sensores remotos favoreceu a delimitação de algumas feições, contribuindo para a compreensão do arcabouço estrutural da região do Quadrilátero Ferrífero, demonstrando assim sua importância em estudos desta natureza. Acredita-se que as estruturas aqui descritas, algumas das quais não representadas mesmo nos mapas de maior detalhe da região, possam contribuir também para a compreensão da evolu-

ção estrutural da área. Dentre estas destaca-se o Domo de Engenheiro Correia, a interface entre o Supergrupo Minas e rochas graníticas a oeste da Serra da Moeda, bem como falhas transcorrentes cortando esta serra, além da cunha da porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Com respeito à ligação Espinhaço-Quadrilátero, os dados obtidos indicam a junção entre a Serra das Cambotas e o Sinclinal Gandarela como "área-chave" para a elucidação do problema.

### 8. AGRADECIMENTOS

São devidos à Sra. Rosely Marques Gimenez pela dedicação e presteza na datilografia dos originais.

### 9. BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA E SOUZA, J.B.; MARTINS Jr., P.P. Missão 110 - SEREMINAS, Área 803 - Itabira, *Relatório de trabalhos de campo*. Instituto de Pesquisas Espaciais, Projeto SERE, 15p., 1972.
- AMARAL, G.; MATTOS, J.T.; ALMEIDA FILHO, R.; CUNHA, R.P.; PARADELLA, W.R. Carta Geológica ao milionésimo da folha de Belo Horizonte. *An. XXIX Congr. Bras. Geologia*, Ouro Preto (MG), 4: 229-238, (anexo), 1976.
- DORR II, J.V.N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 641-A, 110 p., 1969.
- DORR II, J.V.N.; HERZ, N.; BARBOSA, A.L.M.; SIMMONS, G.C. Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, Brazil. *Depto. Nacional da Produção Mineral, Publicação Especial*, 1, 120 p., 1959.
- DUTRA, L.V. Aplicações de filtros bidimensionais curtos em imagens digitais, (inédito), 1980.
- GENERAL ELECTRIC COMPANY (GE) *Image-100*, user manual. Daytona Beach, Fl., 1975.
- GRANT, T.A.; CLUFF, L.S. Radar imagery in defining regional tectonic structure. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 4: 123 - 145, 1976.
- GUILD, P.W. Geology and Mineral Resources of the Congonhas District, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 290, 90 p., 1957.
- GUIMARÃES, D.; MELO, S.M.G. de; VAZ de MELO, E. A. O Complexo de Bação. *Boletim do Instituto de Geologia, EFMOP*, 2 (1): 1-12, 1967.
- HERZ, N. Gneissic and Igneous Rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 641-B, 58 p., 1970.
- HERZ, N. Metamorphic Rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 641-C, 81 p., 1978.

- HERZ, N.; HURLEY, P.M.; PINSON, W.H.; FAIRBAIRN, H.W. Age measurements from a part of the Brazilian Shield. *Bull. Geol. Soc. of America*, 72 (7): 1111 - 1120, 1961.
- JOHNSON, R.F. Geology and Ore Deposits of the Cachoeira do Campo, Dom Bosco, and Ouro Branco Quadrangles. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 341-B, 39 p., 1962.
- KHAIN, V. Ye. *Obchtechaya geotektonika*. Izd-vo Nedra, Moskva, 1973.
- MAC DONALD, H.C.; KIRK, J.N.; DELWIG, L.F. ; LEWIS, A.J. The influence of radar look - direction on the detection of selected geological features. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment*, The University of Michigan, pp. 637-650, 1969.
- MAXWELL, C.H. Geology and Ore Deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 341-J, 72 p., 1972.
- MOORE, S.L. Geology and Ore Deposits of the Antonio dos Santos, Gongo Sôco e Conceição do Rio Acima Quadrangles. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 341-I, 50 p., 1969.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION Mission Summary report, Mission 96. *Earth Resources Aircraft Program, Manned Spacecraft Center, Houston, Texas*, pp. C - 1 - C - 29, 1969.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, H.A. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Bull. Geol. Soc. of America*, 87: 1463-1469, 1976.
- PARADELLA, W.R.; DUTRA, L.V. Filtragens digitais de imagens como técnica de auxílio visual na fotointerpretação geológica. *An. XXXI Cong. Bras. Geologia, Balneário de Camboriú (SC)*, 5: 2959-2964, 1980.
- PARADELLA, W.R.; VITORELLO, I. Application of computerized techniques using LANDSAT MSS images for geological studies. *COGEO DATA, IAMG Meeting for South America*, RJ, Brasil, 26 p., 1981.
- POMERENE, J.B. Geology and ore Deposits of the Belo Horizonte, Ibiritê, and Macacos Quadrangles, Minas Gerais, Brasil. *U. S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 341-D, 84p., 1964.
- RICCOMINI, C. Estudo comparativo entre diferentes produtos de sistemas sensores aplicados à análise litológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Pesquisas Espaciais, 1982.
- RICCOMINI, C.; AMARAL, G. Estruturas circulares internas ao Complexo de Bação, Quadrilátero Ferrífero (MG). *An. XXXI Cong. Bras. Geologia, Balneário de Camboriú (SC)*, 5 : 2975 - 2981, 1980.
- ROWAN, L.C.; WETLAUFER, P.H.; GOETZ, A.F.H. ; BILLINGSLEY, F.C.; STEWART, J.H. Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 883, 35 p., 1974.
- SALOP, L.I. Two types of Precambrian structures: gneiss folded ovals and gneiss domes. *Internat. Geology Rev.*, 14 (11): 1209-1228, 1972.
- SCHORSCHER, H.D.; GUIMARÃES, P.F. Mina do Cauê. *Estratigrafia e Tectônica do Super-Grupo Minas e Geologia do Distrito Ferrífero de Itabira. Roteiro das Excursões, XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto (MG)*, pp. 75-86, 1976.
- STRECKHEISEN, A.L. (chairman) Plutonic Rocks, classification and nomenclature recommended by the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geotimes*, pp: 26 - 30, october, 1973.
- WALLACE, R.M. Geology and Mineral Resources of the Pico do Itabirito District, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Prof. Pap.*, 341-F, 68 p., 1965.

