

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-6118-TDI/579**

**AVALIAÇÃO DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS E DE SUA  
INTEGRAÇÃO COM IMAGENS DIGITAIS TM/LANDSAT 5, NO  
MAPEAMENTO GEOLÓGICO NA SERRA DOS CARAJÁS (PA)**

**Ricardo Ribeiro Dias**

**Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr.  
Waldir Renato Paradella, aprovada em novembro de 1994.**

**INPE  
São José dos Campos  
Janeiro de 1995**



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

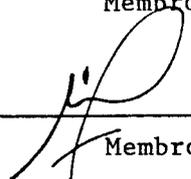
Dr. Waldir Renato Paradella

  
Orientador/Presidente

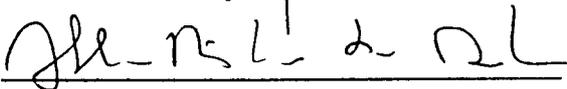
Dr. Daniel Jean Roger Nordemann

  
Membro da Banca

Dr. Raimundo Almeida Filho

  
Membro da Banca

Dr. Athos Ribeiro dos Santos

  
Membro da Banca

Dra. Elisabete Maria Pascholati

  
Membro da Banca  
- Convidada -

Candidato: Ricardo Ribeiro Dias

São José dos Campos, 18 de novembro de 1994



**À minha mulher Danièle Alessa e ao meu filho Paulo Bruno**



## AGRADECIMENTOS

O autor expressa seu reconhecimento a todas as pessoas que colaboraram direto e indiretamente, possibilitando, facilitando e corroborando para a execução desse trabalho referente a sua dissertação de mestrado.

Em especial, os meus sinceros agradecimentos ao Dr. Waldir Renato Paradella, pela orientação desse projeto de dissertação e discussões técnico-científicas, que levaram a sua realização e a minha capacitação profissional.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio, infra-estrutura e suporte indispensáveis para o bom andamento do trabalho.

Ao Distrito Amazônia da Rio Doce Geologia (DOCEGEO), particularmente ao geólogo Ricardo Sausserig, pelo suporte e facilidades que possibilitaram a realização dos trabalhos de campo, além cessão de mapas geológicos da área do Pojuca.

Ao Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) pela liberação dos dados geofísicos pertencentes ao Projeto Geofísico Brasil-Canadá utilizados nesta pesquisa.

A geofísica Maria Laura Vereza de Azevedo da Divisão de Geofísica (DIGEOF) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) do Rio de Janeiro, pelo processamento dos dados geofísicos, referentes a geração de grades regulares e ao inestimável auxílio no provimento de informações referentes aos dados geofísicos do PGBC.

Aos geólogos Athos Ribeiro dos Santos, Chan Chiang Liu, Paulo Veneziani e Pedro Alberto Bignelli pelo acompanhamento nos trabalhos de campo e pelas contribuições dadas durante o desenvolver do trabalho. À geóloga Sílvia Beatriz Alves Rolim pelas informações fornecidas referentes ao Banco de Dados Pojuca.

Aos desenhistas Joaquim Godoi Filho e Sílvio Pereira Coimbra, pelas artes gráficas, prestatividade e amizade dedicada durante o transcorrer desse trabalho.

A todas as bibliotecárias dessa instituição, mas em especial a Marie Hirota Magalhães pela normalização e formatação dos textos, além da amizade dispensada.

Ao fotógrafo Celso Luiz de Farias pelo apoio prestado na obtenção de algumas fotografias que ilustram este trabalho e, as secretárias Vera Lúcia de Andrade, Maria Cristina dos Santos Varlez e Maria Etelvina Reno Dias Arbex.

Ao geólogo Joel Buenano Macambira da Universidade Federal do Pará, pelo fornecimento das descrições petrográficas, mapas geológico e de pontos referentes ao Projeto Pojuca.

Aos meus familiares, pais e tios José Fiorentini Pasquarelli e Dinah Antunes Machado Pasquarelli pelo apoio durante todo o transcorrer dos estudos referentes a esta dissertação de mestrado, além da dedicação e amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo subsídio na forma de bolsa de estudo que foi essencial para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Foram selecionadas duas áreas teste (Folha Serra dos Carajás e a área do Pojuca) situadas na Província Mineral de Carajás para investigação geológica. Utilizou-se nesta pesquisa os dados gamaespectrométricos adquiridos durante os anos de 1975 e 1976, que se referem aos aerolevantamentos do Projeto Geofísico Brasil-Canadá. Os perfis gamaespectrométricos foram coletados, através de linhas de vôo posicionadas segundo a direção N-S e espaçadas de 1 km, com intervalo de amostragem igual a 61 m. Tais perfis convertidos, inicialmente, em grades regulares com resolução de 625 x 625 m, foram transformados em imagens digitais com resoluções de 125 x 125 m e 30 x 30 m (reamostragem). As imagens gama individuais, combinadas e integradas às imagens TM/Landsat, foram analisadas, através das técnicas de processamento digital de imagens (composições coloridas, transformações por componente principal, decorrelação e IHS); bem como visualmente. Os produtos analisados, quando comparados aos mapas geológicos (na escala regional e de semi-detulhe), mostraram que existem fortes correlações espaciais entre as unidades litoestratigráficas, as feições estruturais e os padrões radiométricos. Além disso, foi observado que os dados aerogamaespectrométricos digitais integrados às imagens TM/Landsat, constituem-se em uma ferramenta poderosa para o mapeamento geológico e programas de exploração mineral neste ambiente amazônico com floresta tropical.



## **EVALUATION OF AEROGAMMASPECTROMETRIC DATA AND THEIR INTEGRATION WITH LANDSAT-TM DIGITAL IMAGES, FOR GEOLOGICAL MAPPING IN THE SERRA DOS CARAJÁS (PA)**

### **ABSTRACT**

Two test-sites, covering the Serra dos Carajás sheet (56,5 x 56,5 km) and the Pojuca belt (15,4 x 15,4 km) were selected for geological investigation. Gammaspectrometric airborne data (eU, eTh, Total Count and eU/eTh) were acquired over part of the Serra dos Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region) during the 1975 and 1976 (PGBC - Brazil-Canada Geophysical Program) campaigns. The original data were collected in NS profiles (1 km apart and 61 meter samples along the profiles). The gammaspectrometric data were converted twice, first to a 625 x 625 m grid and then to a 125 x 125 m grid (resampling). The 125 x 125 m data were transformed into digital images with cells of 125 x 125 m and 30 x 30 m. Isolated and combined gamma images were analysed by digital enhancement techniques (color composites, principal component, analysis decorrelation stretch and IHS transform) and visual examination. The UTM registered gamma and TM/Landsat images were integrated through IHS transform. The enhanced products were compared to geological maps and this comparison has demonstrated that lithostratigraphic units and structural features registered on both data source are perfectly concordant. In addition, the research has provided insights regarding the knowledge of the geological model in the study areas. Gamma airborne data whether isolated or integrated with orbital remote sensing data have proved to be a powerful tool for geological mapping and mineral exploration programs in this rain forest Amazon environment.



## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 - Apresentação e objetivos .....	1
1.2 - Organização do trabalho .....	3
<b>CAPÍTULO 2 - ÁREA DE ESTUDO</b> .....	5
2.1 - Localização e acesso .....	5
2.2 - Aspectos fisiográficos .....	6
2.3 - Caracterização geológica .....	8
2.3.1 - Histórico e síntese regional .....	8
2.3.2 - Folha Serra dos Carajás .....	11
2.3.3 - Área do Pojuca .....	15
2.3.4 - Estruturas regionais .....	20
2.4 - Caracterização geofísica da Folha Serra dos Carajás .....	24
2.5 - Caracterização geobotânica da Área do Pojuca .....	27
<b>CAPÍTULO 3 - GEOFÍSICA NUCLEAR</b> .....	31
3.1 - Radioatividade - princípios fundamentais .....	31
3.1.1 - Radiação gama .....	34
3.1.2 - Grandezas físicas .....	35
3.2 - Radioatividade de rochas .....	36
3.3 - Aerogamaespectrometria - considerações gerais .....	40
3.3.1 - Fatores que influenciam as medidas .....	45
3.3.2 - Correções gamaespectrométricas .....	50

<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	53
4.1 - Materiais .....	53
4.1.1 - Aerogamaespectrometria .....	53
4.1.1.1 - Correções gamaespectrométricas .....	54
4.1.2 - Imagens TM/Landsat 5 - Área do Pojuca .....	57
4.1.3 - Mapas temáticos e descrições petrográficas .....	58
4.2 - Metodologia .....	58
4.2.1 - Processamento dos dados gamaespectrométricos .....	60
4.2.1.1 - Geração das grades regulares (MNTs) .....	61
4.2.1.2 - Geração das imagens gama .....	63
4.2.1.3 - Processamento digital das imagens gama .....	66
4.2.1.4 - Integração de dados de naturezas diferentes .....	70
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	75
5.1 - Folha Serra dos Carajás .....	75
5.1.1 - Caracterização geológico-geofísica .....	75
5.1.1.1 - Imagens gama isoladas .....	75
5.1.1.2 - Imagens combinadas .....	86
5.2 - Área do Pojuca .....	88
5.2.1 - Caracterização geológico-geofísica .....	88
5.2.1.1 - Imagens gama isoladas .....	88
5.2.1.2 - Imagens gama combinadas .....	95
5.2.2 - Integração das imagens gama e TM/Landsat .....	98
5.2.3 - Caracterização geobotânica-geofísica .....	102
<b>CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	105
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	109
<b>APÊNDICE A - GRANDEZAS FÍSICAS</b> .....	119

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 - Localização da área de estudo .....	6
2.2 - Mapa de distribuição das principais unidades litoestratigráficas da Província Mineral de Carajás.....	10
2.3 - Mapa geológico simplificado da Folha Serra dos Carajás .....	12
2.4 - Mapa geológico simplificado da Área do Pojuca.....	16
2.5 - Mapa geológico regional simplificado da Área do Pojuca.....	17
2.6 - Mapa estrutural simplificado exibindo o terreno granito <i>greenstone</i> do sul do Pará e os cinturões Itacaiúnas e Araguaia.....	21
2.7 - Cinturão Itacaiúnas - domínio imbricado (distribuição das unidades litoestratigráficas e arranjo estrutural simplificado).....	22
2.8 - Cinturão Itacaiúnas - domínio transcorrente definido pelo sistema Serra dos Carajás (distribuição das unidades litoestratigráficas e arranjo estrutural simplificado).....	23
2.9 - Mapa de interpretação radiométrica e magnética da Folha Serra dos Carajás...	25
2.10 - Mapa de classes geobotânicas.....	28
2.11 - Representação esquemática dos tipos de vegetação associadas às classes geobotânicas.....	30
3.1 - Representação esquemática da coleta de dados aéreos de raios gama em relação à direção das litologias .....	41
3.2 - Espectros de energia das emissões gama dos radioelementos <sup>40</sup> K, <sup>238</sup> U e <sup>232</sup> Th	43
3.3 - Representação esquemática de um espectrômetro aéreo.....	44
3.4 - Resolução espacial estimada em função da altitude do detector.....	49
3.5 - Porcentagens de cobertura do terreno em função do espaçamento das linhas de vôo para altitudes fixas (H) .....	50
4.1 - Sequência de trabalho.....	59
4.2 - Sequência de operações no SGI/INPE para geração de imagens digitais, a partir de grades retangulares regulares .....	65
4.3 - Histograma das imagens U, Th, CT e U/Th da área do Pojuca .....	67
4.4 - Metodologias de processamento para integração das imagens gama e TM/Landsat, estabelecidas na investigação .....	74
5.1 - Imagem CT mostrando os domínios e subdomínios radiométricos detectados ..	77

5.2 - Imagem eU mostrando os domínios e subdomínios radiométricos individualizados.....	82
5.3 - Imagem eTh mostrando os domínios e subdomínios radiométricos identificados.....	85
5.4 - Composição colorida eU(R), CT(G) e eTh(B) exibindo os domínios e subdomínios radiométricos identificados .....	87
5.5 - Imagem eU mostrando a separação entre o Complexo Xingu e Gr. Igarapé Pojuca (bb'), o limite inferior do granito Itacaiúnas e os padrões radiométricos detectados.....	91
5.6 - Imagem eTh exibindo a borda que separa o Complexo Xingu e Gr. Pojuca (bb'), o limite inferior do granito Itacaiúnas (aa'),bem como os padrões radiométricos detectados .....	93
5.7 - Imagem eU/eTh exibindo os contrastos radiométricos do granito Itacaiúnas, bem como seus demais padrões radiométricos individualizados .....	95
5.8 - Composição colorida dos canais eU, eTh e CT decorrelacionados, exibindo os domínios e subdomínios fotointerpretados.....	97
5.9 - Histograma do canal H, mostrando a distribuição dos pixels no espaço de cores .....	99
5.10- Produto final da transformação IHS, exibindo as unidades fotogeológicas individualizadas .....	101
5.11 - Grandes classes de vegetação da Área do Pojuca .....	104

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
2.1 - Níveis radiométricos (CT) de algumas unidades litológicas da área de estudo ..	27
3.1 - Símbolos e unidades usados em radiometria.....	36
3.2 - Conteúdo natural médio de K, U e Th em rochas ígneas .....	38
3.3 - Conteúdo natural médio de K, U e Th em rochas sedimentares .....	39
3.4 - Conteúdo natural médio de K, U e Th em rochas metamórficas .....	40
3.5 - Janelas espectrais usadas para medir a energia dos raios gama .....	42
4.1 - Coeficientes de interação entre canais usados para correção do efeito Compton .....	55
5.1 - Grau de separabilidade entre as unidades estratigráficas da folha Serra dos Ca- rajás .....	76
5.2 - Grau de separabilidade entre as unidades estratigráficas da área do Pojuca.....	89



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

A Amazônia brasileira, com dimensão territorial que lhe confere um estatuto de quase continente, constitui-se em um sítio geológico de grande potencialidade econômica, concentrando as principais reservas minerais do país em uma variedade de ambientes geológicos. Esta região detém apreciáveis reservas de minérios tradicionais (ferro, bauxita, ouro e cassiterita) e de minérios com novas aplicações tecnológicas (nióbio, manganês e titânio), além de apresentar ambientes geológicos promissores para pesquisa de outros bens minerais.

Desde a década de 60, a Amazônia vem sendo palco de prospecção mineral, principalmente após a descoberta das jazidas de minério de ferro em Carajás (1967), sul do estado do Pará. Essa descoberta incentivou, a partir da década de 70, o estabelecimento de amplos programas de pesquisas geológicas com tecnologia mais avançada. Entre tais programas destacam-se: o levantamento radarmétrico (Projeto RADAMBRASIL), os levantamentos aerogeofísicos (Projeto Geofísico Brasil-Canadá, Sul do Pará e Jari-Rio Negro) e os mapeamentos geológicos regionais realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), sob contrato com o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), (Santos, 1983).

Devido às complexidades ambientais da Amazônia, fatores como: o **clima tropical** predominante, que favorece o intemperismo químico das rochas e a formação de espessas camadas de solo; **a densa cobertura vegetal** e **a escassez de vias de acessos**, dificultam a extração de informações geológicas durante a execução de trabalhos de mapeamento e prospecção. Esses fatores tornam importantes e indispensáveis o uso, a combinação e a integração de dados indiretos de naturezas diferentes (geoquímica, geofísica e de sensoriamento remoto).

Uma nova ênfase ao uso, combinação e integração de dados de naturezas diferentes vem sendo empregada, mediante ao avanço tecnológico dos sistemas computacionais, sistemas de análises de imagens e de informações geográficas

(SIGs). Isto se deve aos diferentes métodos de representação, exibição e processamento dos dados de sistemas imageadores e não-imageadores. A base dessa tecnologia de representação dos dados dos sistemas não-imageadores, é o formato *raster*.

Na representação *raster*, os dados dos sistemas não-imageadores são transformados em uma matriz de células (*pixels*) distribuídas regularmente em um espaço bidimensional, que representa uma área da superfície ou subsuperfície (Burrough, 1986). Essa matriz de células, através das técnicas de processamento digital de imagens torna possível uma extração rápida e eficiente de informações, baseado em níveis de cinza.

A partir dessa maior flexibilidade no uso, análise, combinação dos dados de sistemas não-imageadores e de sua integração com dados de sensores remotos imageadores (TM/Landsat, HRV/SPOT, ERS-1, etc.), é possível admitir que sejam encontrados melhores resultados nas investigações geológicas nos ambientes da Amazônia. Desta forma, o objetivo geral desse trabalho, que tem sua área teste situada na Província Mineral dos Carajás, constitui-se na:

- avaliação das imagens gama isoladas e combinadas entre si, para a discriminação e identificação das principais unidades litoestratigráficas da Serra dos Carajás, baseado em comparações com os mapas geológicos da **Folha Serra dos Carajás** (esc.1:250.000; CPRM, 1991) e da **Área do Pojuca**, de semi-detalhe e detalhe elaborados pela DOCEGEO (1984) e Macambira et al. (1990).

Os objetivos específicos são:

- 1) geração e realce de imagens gama, utilizando-se um SIG e um sistema de tratamento de imagens digitais;
- 2) verificação da relação entre as imagens gama (respostas radiométricas) e os tipos litológicos da **Área do Pojuca**, baseado no mapa de descrições petrográficas
- 3) avaliação da relação entre as imagens gama e as classes geobotânicas definidas para a **Área do Pojuca** e;

- 4) avaliação do potencial da integração das imagens gama com as TM/Landsat, visando além da discriminação de unidades litológicas, a identificação de padrões estruturais na **Área do Pojuca**.

## 1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido de acordo com as características da pesquisa, em cinco segmentos principais:

- 1) **caracterização da área de estudo**, referindo-se aos aspectos fisiográficos, vegetação e contexto geológico;
- 2) **revisão dos princípios da geofísica nuclear** compreendendo: a radioatividade natural, as características da radiação gama, a radioatividade de rochas e a espectrometria aérea de raios gama;
- 3) **abordagem metodológica**, utilizando dos sistemas de informação geográfica (SGI/INPE) e de processamento de imagens digitais (SITIM/INPE) para operações como: a) geração de grades regulares e imagens gamaespectrométricas, b) realce e integração das imagens gamaespectrométricas e TM/Landsat e, c) interpretação visual qualitativa dos produtos finais obtidos;
- 4) **discussão dos resultados**;
- 5) **conclusões**.



## CAPÍTULO 2

### ÁREA DE ESTUDO

#### 2.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área selecionada para essa investigação geológica está inserida na Província Mineral dos Carajás, município de Parauapebas, que por sua vez encontra-se localizada na porção oriental do estado do Pará (Figura 2.1). Esta área de estudo, com aproximadamente 3.300 km<sup>2</sup>, está dividida em duas subáreas, compreendendo:

- **Folha Serra dos Carajás (SB.22-Z-A-II)**, cujas coordenadas UTM são:

OESTE	SUL
555400	9279400 canto superior esquerdo
610700	9336700 canto inferior direito

- **Área do Pojuca** correspondendo em coordenadas UTM a:

OESTE	SUL
558240	9348910 canto superior esquerdo
573630	9333520 canto inferior direito

As vias de acesso a área de estudo são três: a aérea, a rodoviária e a ferroviária. Por via aérea, o acesso se dá através de aviões de pequeno e grande portes. Via rodoviária, o acesso é realizado utilizando-se a rodovia PA-150 que liga Belém a Marabá, prosseguindo pela rodovia Transcarajás (PA-275), que leva ao Núcleo Urbano de Carajás, passando pela cidade de Parauapebas. A partir do uso da rede ferroviária, o acesso é possível através da ferrovia instalada pela Companhia do Vale do Rio Doce (CVRD), que liga a mina N1 ao porto de Itaquí, situado na cidade de São Luís (MA).



O mais expressivo conjunto geomorfológico do Planalto Dissecado do Sul do Pará, com cotas em torno de 700 m, é a Serra dos Carajás. A Serra dos Carajás apresenta-se dividida em Serra Norte e Sul, sendo elas caracterizadas por topos extensos de formatos aplainados. Tais topos tendenciam, localmente, à tabulares quando sustentados por carapaças ferruginosas. São pouco identificados os topos de formas arredondas e, mais restritos os de formas angulares, que estão presentes no flanco sudoeste da Serra dos Carajás.

A segunda unidade, a **Depressão Periférica do Sul do Pará**, constituída pelo relevo de morro e colinoso, é resultado da atuação de processos erosivos pós-pleiocênicos. O relevo de morros é caracterizado por topos geralmente arredondados, aplainados e angulares localmente, apresenta além dos morros algumas serras restritas, por vezes alongadas/alinhadas e isoladas. Esse tipo de relevo (serras) corresponde à porção mais movimentada de um sistema estrutural imbricado. O relevo colinoso apresenta-se com cotas em torno de 200 m, atingindo máximos e mínimos de altitude de 300 m e 170 m, respectivamente. Em consequência dos tipos rochosos que o caracteriza, o relevo colinoso corresponde à porção mais aplainada da Depressão Periférica do Sul do Pará, exibindo formas variadas, desde arredondadas a angulosas.

Quanto ao clima, a área de estudo está inserida em uma região de clima do tipo Am, segundo a classificação de Köppen. Este clima é descrito como tropical úmido de monção apresentando uma temperatura média mínima de 10 a 26 °C e, média máxima de 25 a 35 °C. Nesta região, predomina o regime de precipitação tropical caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa e outra seca. A estação chuvosa com duração de novembro a maio caracteriza-se por índices de precipitação de 800 a 1200 mm, enquanto o período de seca compreende o intervalo de junho a novembro.

Quanto a hidrografia, a área de estudo caracteriza-se pela bacia do rio Itacaiúnas, afluente pela margem esquerda do rio Tocantins. Os tributários principais do rio Itacaiúnas são: os rios Parauapebas, Cinzento, Águas Claras e Itapirapé, além do Igarapé Azul.

De modo geral, a cobertura vegetal na Serra dos Carajás, segundo Veloso et al. (1974), é caracterizada por uma vegetação bastante densa com árvores de grande porte e copas amplas intercaladas por espécies mais finas (Floresta Densa de Montana). Nas regiões dos contrafortes mais baixos da Serra dos Carajás e sítios arrasados, a vegetação está representada por dois ecossistemas: 1) árvores bastantes uniformes com altura entre 10 e 25 m (Floresta Densa Submontana com Floresta Aberta Latifoliada) e, 2) árvores emergentes com altura de 35 m em média, caracterizada sobretudo por babaçú e castanheiras (Floresta Mista combinada com Floresta Aberta).

Paradella et al. (1994) após reconhecimentos botânicos aéreo e terrestre combinados, classificaram a cobertura vegetal da Área do Pojuca, em três formações principais: 1) Floresta Equatorial Ombrófila Densa; 2) Floresta Equatorial Ombrófila Aberta e 3) Floresta Aluvial.

## **2.3 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA**

### **2.3.1 - HISTÓRICO E SÍNTESE REGIONAL**

Regionalmente, a área de estudo pertence a Província Mineral de Carajás, que está limitada a leste pelos rios Araguaia-Tocantins, a oeste pelo rio Xingu, a norte pela Serra do Bacajá e, a sul pela Serra dos Gradaús. Este território vem sendo palco de investigações geológicas desde a década de 30, mas a partir da década de 60, com a descoberta de alguns depósitos de minérios, intensificaram-se os programas de pesquisas geológicas, que até então, tinham aspectos de caráter regional e, por vezes, prospectivos. Os trabalhos dessa época enfocavam, principalmente: descrição de rochas, agrupamentos em unidades, empilhamentos estratigráficos e alguns esboços de compartimentação em nível de províncias geológicas.

Durante a década de 70, os trabalhos referem-se ainda a descrição de rochas, empilhamentos estratigráficos, mais iniciam-se os esboços de compartimentação e definição de províncias geológicas, sucessão de eventos tectônicos e quadros evolutivos fundamentados em datações geocronológicas.

Na década de 80, continuam os trabalhos geológicos de caráter regional caracterizados por descrições petrogenéticas e geocronológicas, interpretações geotectônicas, sendo paralelamente proposto a existência de vários cinturões móveis proterozóicos envolvendo núcleos cratônicos, baseados em datações radiométricas.

Destacam-se como sínteses dos conhecimentos geológicos da Província Mineral de Carajás, durante as décadas citadas anteriormente, os trabalhos de Beisiegel et al. (1973); o Projeto RADAMBRASIL (1974); Hirata (1982); Hirata et al. (1982); Cordani e Brito Neves (1982); Tassinari et al. (1987); DOCEGEO (1988), entre outros.

A Província Mineral dos Carajás, é uma região estratigráfica e estruturalmente complexa, onde a maioria dos contatos litológicos entre unidades distintas aparecem obliterados por feições de cisalhamento. Tais fatos fazem com que esta província apresente uma variada nomenclatura estratigráfica devido a uma falta de convergência para a definição dos agrupamentos litológicos. Desta forma serão utilizadas neste trabalho às denominações de DOCEGEO (1984; 1988), Macambira et al. (1990) e CPRM (1991) para a caracterização das unidades litoestratigráficas da Folha Serra dos Carajás e Área do Pojuca. Tal decisão foi tomada porque não faz parte do objetivo deste trabalho uma revisão estratigráfica.

A Província Mineral de Carajás é constituída predominantemente por rochas pré-cambrianas de origem variada e de distintos graus metamórficos. Reconhece-se, nesta região, um núcleo granito-*greenstone* envolvido por terrenos granito-gnaíssicos e faixas de rochas supracrustais associadas, fortemente lenticularizadas. Estas sequências de supracrustais, reunidas genericamente como coberturas do cráton Amazônico, encontram-se cortadas por granitos proterozóicos (Figura 2.2).

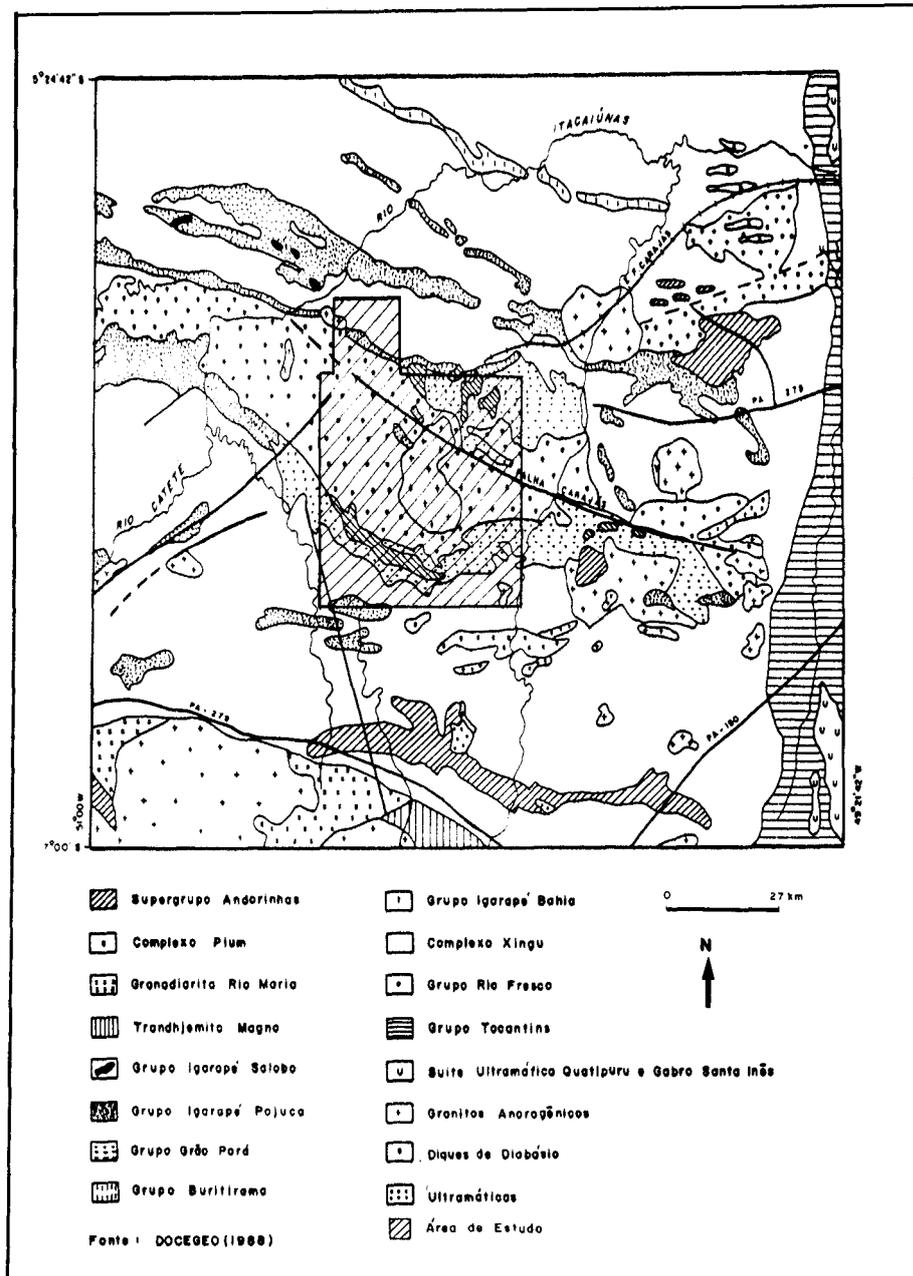


Fig. 2.2 - Mapa de distribuição das principais unidades litoestratigráficas da Província Mineral de Carajás.

FONTE: DOCEGEO (1988), p. 13.

### 2.3.2 - FOLHA SERRA DOS CARAJÁS

As unidades estratigráficas presentes no domínio da Folha Serra dos Carajás correspondem a: Complexos Xingu e Pium, Grupos Sapucaia, Grão Pará e Suítes Plaquê e Granítica Anorogênica, bem como ao plutonismo mesozóico e as coberturas cenozóicas (Figura 2.3).

#### - COMPLEXOS XINGU E PIUM

O **Complexo Xingu** (embasamento cristalino) foi definido por Silva et al. (1974), ocorre nas porções S e NNE da área. Esse complexo foi definido como sendo representado por um conjunto de rochas polimetamórficas, metamorfasadas do fácies xisto verde à granulito, compreendendo genericamente: gnaisses, migmatitos, anfibolitos, zonas de rochas graníticas, máficas e ultramáficas. Segundo Hirata (1982), dentro do domínio desse complexo ocorrem, ainda, os terrenos do tipo *greenstone belts*, com baixo grau metamórfico representados por metassedimentos químicos e clásticos e, metavulcânicas ácidas e básicas. DOCEGEO (1988), considera dentro do conceito atual, que o Complexo Xingu na região é composto por rochas gnaíssicas, às vezes migmatizadas, de composições tonalíticas, trondhjemíticas e/ou granodioríticas, tidas como retrabalhamento metamórfico sobre os terrenos graníticos arqueanos.

O **Complexo Pium**, originalmente, definido por Hirata et al. (1982) como um complexo estratiforme máfico-ultramáfico do fácies granulito, expõe-se de forma alongada na parte SSE da Folha Serra dos Carajás. CPRM (1991) mantém-se a terminologia de Complexo Pium, no entanto, visualiza-se uma complexa situação estratigráfica, propondo a terminologia rochas granolíticas e redefine as rochas granulíticas do Complexo Pium, como rochas granolíticas, sem conotação granulométrica. Assim, o Complexo Pium passa a encerrar rochas granolíticas representadas por tipos ácidos e básicos (enderbitos, charnoquitos, granoblastitos, piriclasitos) com retrometamorfismo ao fácies anfibolito, devido aos efeitos de cisalhamento.

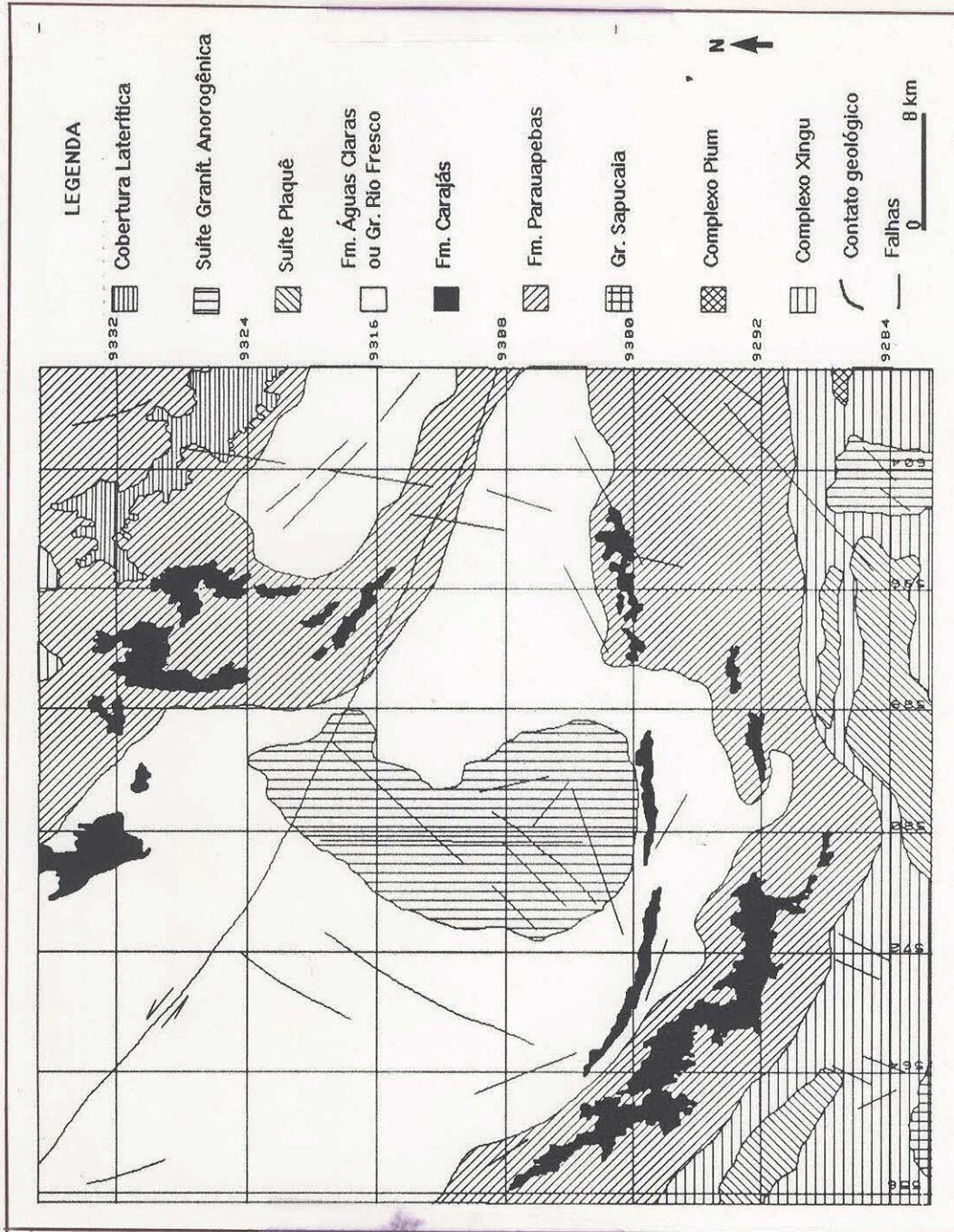


Fig. 2.3 - Mapa geológico simplificado da Folha Serra dos Carajás.

FONTE: CPRM (1991).

### - GRUPO SAPUCAIA

Com relações de contato concordantes com as rochas do Complexo Xingu, depositou-se uma sequência de supracrustais de natureza metavulcano-sedimentar, com paragêneses diagnósticas do fácies xisto verde baixo, denominada **Grupo Sapucaia**. Esse conjunto litológico, que ocorre na porção SW da Folha Serra dos Carajás, é dominado por metamafitos, metaultramafitos e metassedimentos, cujo padrão textural é inerente aos efeitos produzidos pela milonitização regional (CPRM, 1991). Esse grupo associado a outros dados geológicos da região, caracteriza uma sequência ou um seguimento do tipo *greenstone belt* retrabalhado em regime de cisalhamento no final do Arqueano.

### - SUPERGRUPO ITACAIÚNAS

DOCEGEO (1988) propõe a denominação de Supergrupo Itacaiúnas para englobar o Grupo Grão Pará e, as demais unidades associadas a ele, que ocorrem na Serra dos Carajás. Essas unidades são definidas como os grupos: Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Igarapé Bahia e Buritirama. A característica principal desse supergrupo é mostrar-se como produto de uma evolução em um ambiente vulcano-sedimentar, de idade Arqueana, mas litologicamente distinto dos *greenstone belts*. Na área de estudo, dos grupos mencionados acima, ocorre apenas o **Grupo Grão Pará**.

### - GRUPO GRÃO PARÁ

O **Grupo Grão-Pará**, originalmente foi definido pela CVRD/AMZA (1972), como uma sequência metavulcano-sedimentar, composta por três unidades litológicas, denominadas da base para o topo como: Paleovulcânica Inferior (metabasaltos), Formação Carajás (itabirito e minério de ferro) e Paleovulcânica Superior (metabasaltos). Meireles et al. (1984) identificaram metavulcânicas félsicas intercaladas na Paleovulcânica Inferior e, as definiram como Formação Parauapebas. CPRM (1991), propõe a manutenção do termo Formação Parauapebas e, define o Grupo Grão Pará envolvendo as formações: **Parauapebas, Carajás e Águas Claras**.

A **Formação Parauapebas**, cobre áreas consideravelmente extensas nas porções S e NE da Folha Serra dos Carajás, apresentando como principais litologias: rochas metavulcânicas básicas e ácidas (metabasaltos, dacitos e riolitos) com variada alteração hidrotermal. A **Formação Carajás**, com caráter levemente lenticularizado, encontra-se localmente distribuída nas porções SW, SE, NE e N da Folha Serra dos Carajás. Esta formação compreende, essencialmente, as formações ferríferas bandadas (BIFs) e os corpos de minério de ferro associados. A **Formação Águas Claras** (unidade superior), tem sua distribuição concentrada na região central da Folha Serra dos Carajás. Esta formação é um conjunto de rochas metassedimentares clasto-químicas, de baixo grau metamórfico, constituído por metarenitos conglomeráticos subarcoseanos, metassiltitos e metargilitos. Quanto à terminologia Formação Águas Claras, cabe ressaltar que a mesma refere-se à porção metassedimentar ao **Grupo Rio Fresco** definido por Cunha et al. (1984).

#### - SUÍTE PLAQUÊ

Araújo et al. (1988) identificaram e cartografaram os granitóides deformados e lenticulares da Folha Serra dos Carajás, denominado-os de **Suíte Plaquê**. CPRM (1991) sugeriu acrescentar à referência geográfica Plaquê, o termo informal granito estratóide, com o qual a unidade ficou mais precisamente caracterizada, tanto por sua predominância composicional quanto por sua feição morfológica muito sugestiva do seu mecanismo de geração e colocação. A **Suíte Plaquê**, com contatos em conformidade com as unidades do Complexo Xingu, tem sua distribuição na Folha Serra dos Carajás concentrada nas partes S e SW. Esta suíte é representada litologicamente por tipos granitóides estratóides leucocráticos, potássicos, e, a duas micas, que se apresentam deformadas e metamorfasadas no fácies anfibólito.

#### - SUÍTE GRANÍTICA ANOROGÊNICA

A **Suíte Granítica Anorogênica** encerra diversos maciços de alcali-feldspatos granitos e granitos pórfiros, intrusivos nas rochas do Complexo Xingu, Grupo Rio Fresco e Supergrupo Itacaiúnas. Estes maciços localizados nas partes central, SE e NW da área de estudo exibem, além das homogeneidades textural e mineralógica, características rapakivíticas e processos de albitização. O principal batólito granítico da Serra dos Carajás, é o **Granito Central Serra dos Carajás**, que é composto por vários

maciços grosseiramente circulares, de composição granítica a ganodiorítica, geralmente com biotita associada (Hirata, 1982). Segundo Dall'Agnol (1982) a porção norte do Granito Central da Serra dos Carajás é constituída por anfibólio-biotita granito, muito grosseiro, equigranular, de coloração avermelhada que se enquadra, em geral, entre os sieno-granitos. Dall'Agnol (1980), a partir de estudos geoquímicos observou, neste corpo granítico intrusivo, um enriquecimento de potássio em relação ao sódio, através de razões  $K_2O/Na_2O$  altas.

### **- PLUTONISMO MESOZÓICO E COBERTURAS CENOZÓICAS**

As rochas referentes ao plutonismo básico de idade mesozóica, são representadas por diques de diabásio orientados segundo a direção NE-SW. Finalizando a coluna estratigráfica da região, foram mapeadas várias coberturas fanerozóicas paleogênicas e quaternárias, sobre as mais variadas unidades geológicas distribuídas nos domínios da área. As mais expressivas coberturas lateríticas paleogênicas, dizem respeito aos extensos platôs detrito-lateríticos (bauxíticos) ocorrentes em grande área da Serra Norte. Na verdade essas coberturas, constituem-se em platôs de contornos irregulares e encostas íngremes, que se desenvolveram sobre as unidades máficas da Formação Parauapebas do Grupo Grão Pará. As coberturas quaternárias são constituídas basicamente por material proveniente de um retrabalhamento em um ambiente coluvionar, eluvionar ou aluvionar. Os colúvios e elúvios estão representados por material fragmentado por desagregação mecânica, bem como por porções sílticas e argilosas. Já os alúvios são, essencialmente constituídos por areias, cascalhos, siltes e argilas, em proporções variáveis (CPRM, 1991).

#### **2.3.3 - ÁREA DO POJUCA**

Litologicamente, a Área do Pojuca exhibe as seguintes unidades estratigráficas: Complexo Xingu, Grupos Igarapé Pojuca e Rio Fresco, Granitos tipo Carajás, gabro Santa Inês, Fm. Igarapé Azul e coberturas cenozóicas (Figuras 2.4 e 2.5) DOCEGEO (1984) e Macambira et al. (1990).

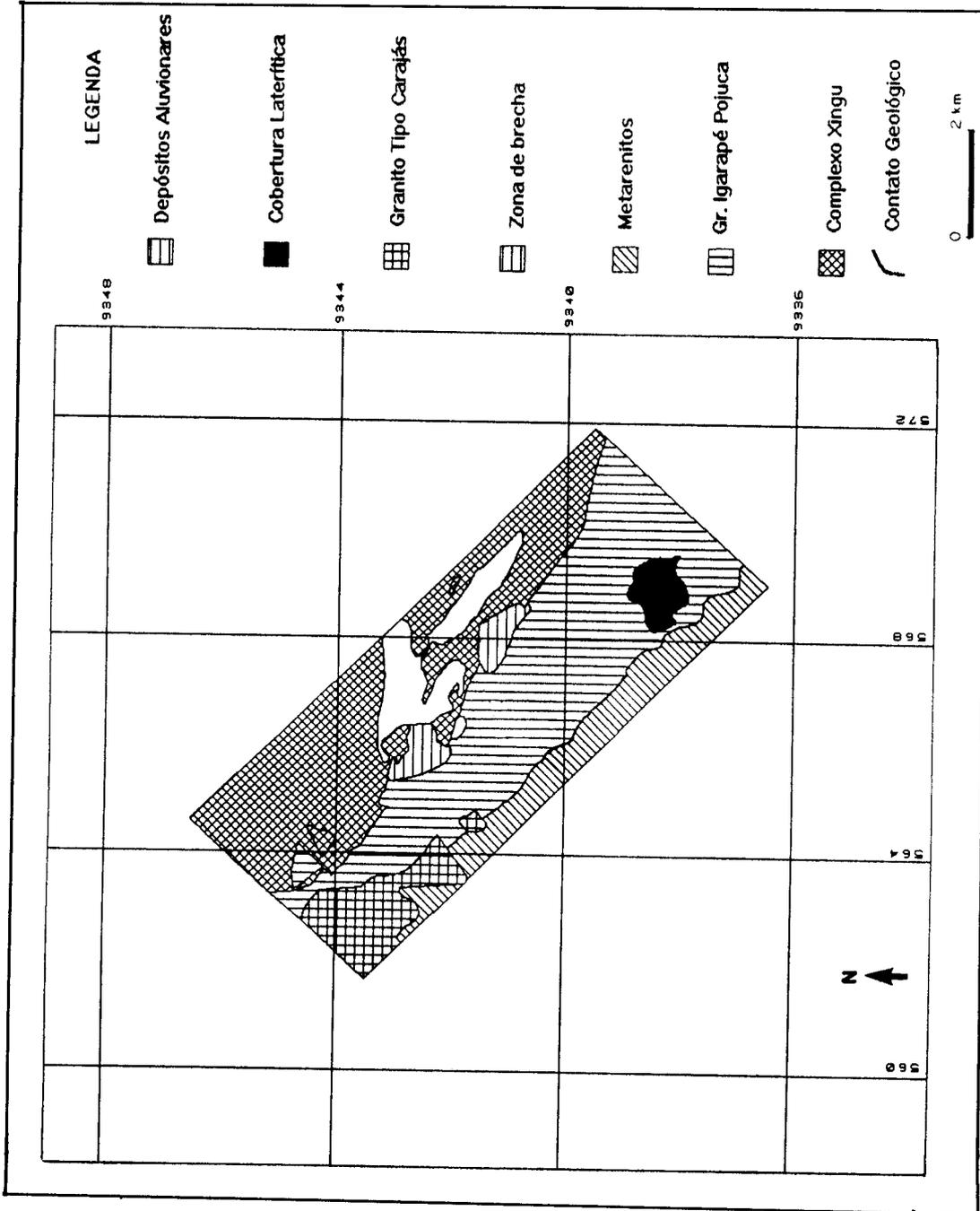


Fig. 2.4 - Mapa geológico simplificado da Área do Pojuca.

FONTE: DOCEGEO (1984).

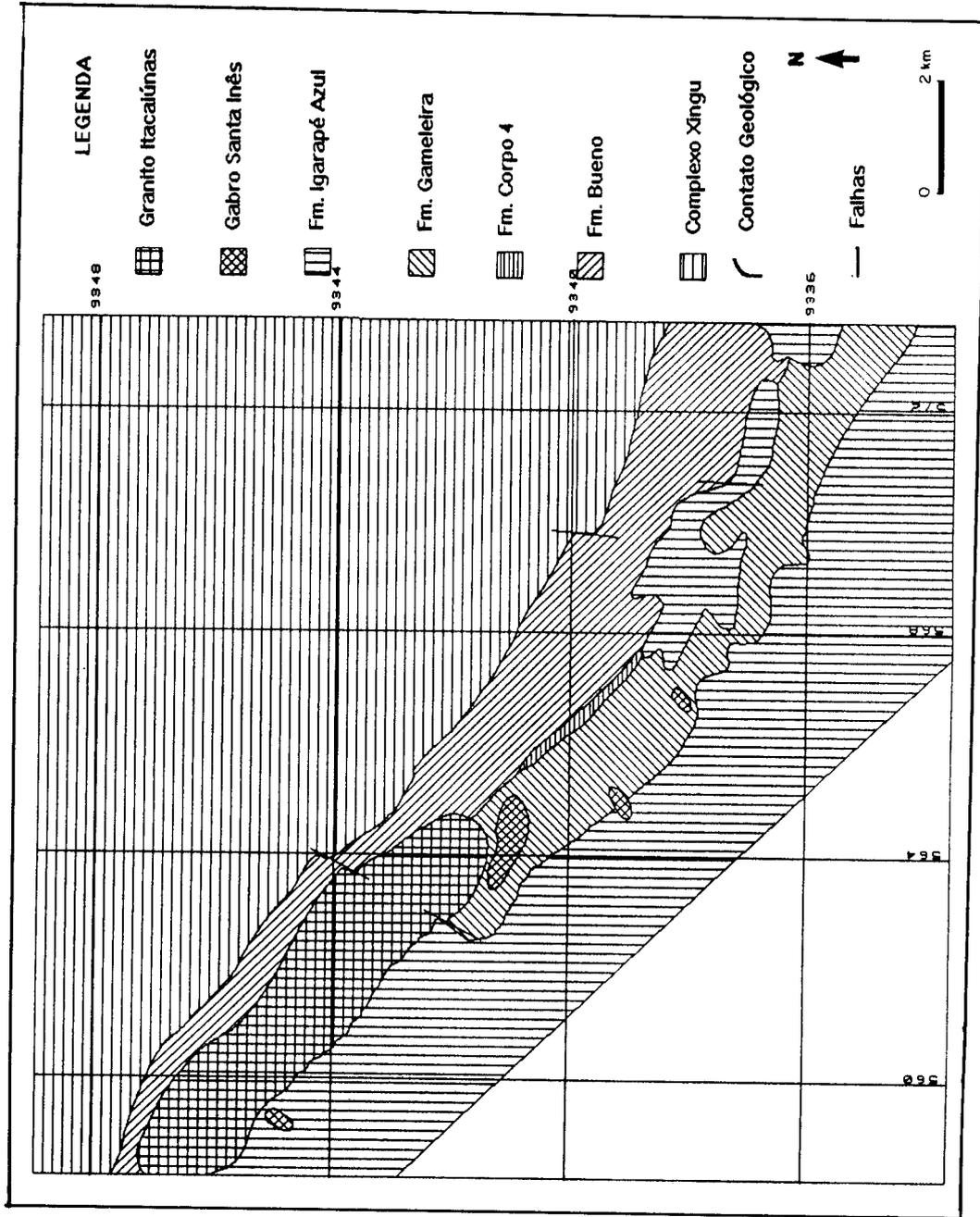


Fig. 2.5 - Mapa geológico regional simplificado da Área do Pojuca.

FONTE: Macambira et al. (1990).

## **- COMPLEXO XINGU**

O **Complexo Xingu** (embasamento cristalino) definido por Silva et al. (1974) não será descrito novamente, uma vez que o mesmo já foi descrito anteriormente no item 2.3.2.

## **- GRUPO IGARAPÉ POJUCA**

Discordante estruturalmente, sobre as rochas do Complexo Xingu, depositou-se a sequência metavulcano-sedimentar, denominada de **Grupo Igarapé Pojuca** (DOCEGEO, 1988). Esta sequência encerra rochas metavulcânicas básicas e intermediárias alteradas por ação hidrotermal e, metassedimentares de composição variada.

Os tipos litológicos desse grupo apresentam-se metamorfisados do fácies xisto verde a anfibolito, sendo agrupados conforme DOCEGEO (1987) e Macambira et al. (1990) em três formações: (1) Fm. Bueno (base), composta por formação ferrífera (BIFs) e anfibolitos variados (hornblenditos, biotita-hornblenda xistos); (2) Fm. Corpo 4 compreendendo metassedimentos clasto-químico e metavulcânicas (xistos variados) e ; (3) Fm. Gameleira (topo), uma sequência de metarenitos e metassiltitos. Seccionam esta sequência de rochas metavulcano-sedimentares, granitos anorogênicos, correlacionados ao Granito Carajás, metagabros e metadiabásios.

## **- FM. IGARAPÉ AZUL (OU GRUPO RIO FRESCO OU FM. ÁGUAS CLARAS)**

A definição das litologias metassedimentares pelíticas e psamíticas, localizadas na Serra dos Carajás, como Fm. Igarapé Azul (ou Gr. Rio Fresco ou Fm. Águas Claras), iniciou-se com Silva et al. (1974). Este autor denominou tais metassedimentos como Membros Azul e Naja pertencentes a Fm. Rio Fresco. Tal fato levou diversos autores a considerarem todo e qualquer metassedimento encontrado na Serra dos Carajás como Fm. Rio Fresco. Mais tarde, Cunha et al. (1984) elevaram os membros Azul e Najá à categoria de Fm. Igarapé Azul e Fm. Rio Najá pertencendo ao Gr. Rio Fresco.

Segundo Macambira et al. (1990) as rochas metassedimentares sobrejacentes ao Gr. Grão Pará, na Serra dos Carajás, foram denominadas de Fm. Igarapé Azul. Ainda consideram que a Fm. Igarapé Azul está restrita à região da Serra dos Carajás e não pertence ao Gr. Rio Fresco. Esta formação segundo o mesmo autor, está sobreposta ao Gr. Igarapé Pojuca, através de uma inconformidade.

A Fm. Igarapé Azul ou Gr. Rio Fresco é uma sequência de rochas, de caráter transgressivo, com granulometria grosseira na base que grada para fina no topo. Seus principais litótipos são metarenitos subarcoseanos, metassiltitos, metargiltos e metassedimentos químicos associados a um metamorfismo regional entre a zona de anquimetamorfismo e fácies xisto verde baixa.

#### **- GABRO SANTA INÊS**

Segundo Macambira et al. (1990) são denominados de Gabro Santa Inês os vários corpos gabróicos na forma de diques intrusivos na Fm. Igarapé Azul. Tais corpos de rochas são formados por gabros leucocráticos e anortosíticos, geralmente bastante intemperizados, de granulação média a grossa. A composição mineralógica essencial deste gabros são plagioclásio (50-70%), anfibólio (20-45%) e piroxênio (0-20%), enquanto seus minerais acessórios são titanita, apatita e opacos que apresentam-se alterados hidrotermalmente.

#### **- GRANITO ITACAIÚNAS OU TIPO CARAJÁS**

Segundo Macambira et al. (1990), o Granito Itacaiúnas ou tipo Carajás (DOCEGEO, 1984), intrusivo nas rochas do Gr. Igarapé Pojuca, apresenta-se alongado segundo a direção E-W, com as seguintes características: coloração de tons róseos e cinzas, granulação média a grossa, sem orientação, composto basicamente por quartzo, feldspato potássico (microclínio), plagioclásio (anortita) e biotita, além de sulfetos (calcopirita e bornita). Este corpo granítico intrusivo segundo o mesmo autor apresenta uma variação mineralógica de leste para oeste, marcada pelo aumento de microclínio com macla, e também, das pertitas.

## - COBERTURAS CENOZÓICAS

As coberturas lateríticas são de ocorrência muito comum na área, principalmente sob a forma de extensos platôs. Segundo Macambira et al. (1990) as lateritas derivadas das rochas do Grupo Igarapé Pojuca (xistos) apresentam alta proporção de argilas, de óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsita). Além dessas características, localmente, observam-se feições reliquiares de foliação.

As coberturas quaternárias são constituídas basicamente por material proveniente de um retrabalhamento em um ambiente coluvionar, eluvionar ou aluvionar. Os colúvios e elúvios estão representados por material fragmentado por desagregação mecânica, bem como por porções silticas e argilosas. Já os alúvios são, essencialmente constituídos por areias, cascalhos, siltes e argilas, em proporções variáveis (CPRM, 1991).

### 2.3.4 - ESTRUTURAS REGIONAIS

O padrão estrutural regional da Província é caracterizado pela presença de falhamentos transcorrentes e dobramentos de grande porte, que exibem nas unidades litológicas presentes na área estruturas do **cinturão Itacaiúnas, estruturas proterozóicas e fanerozóicas**.

O **cinturão Itacaiúnas** (Figura 2.6), caracterizado cinematicamente por um regime compressivo oblíquo, formado por zonas de cisalhamento dúcteis que apresentam um padrão lenticularizado de direção WNW-ESE, está dividido em dois domínios estruturais distintos: o **imbricado** e o **transcorrente** (CPRM, 1991).

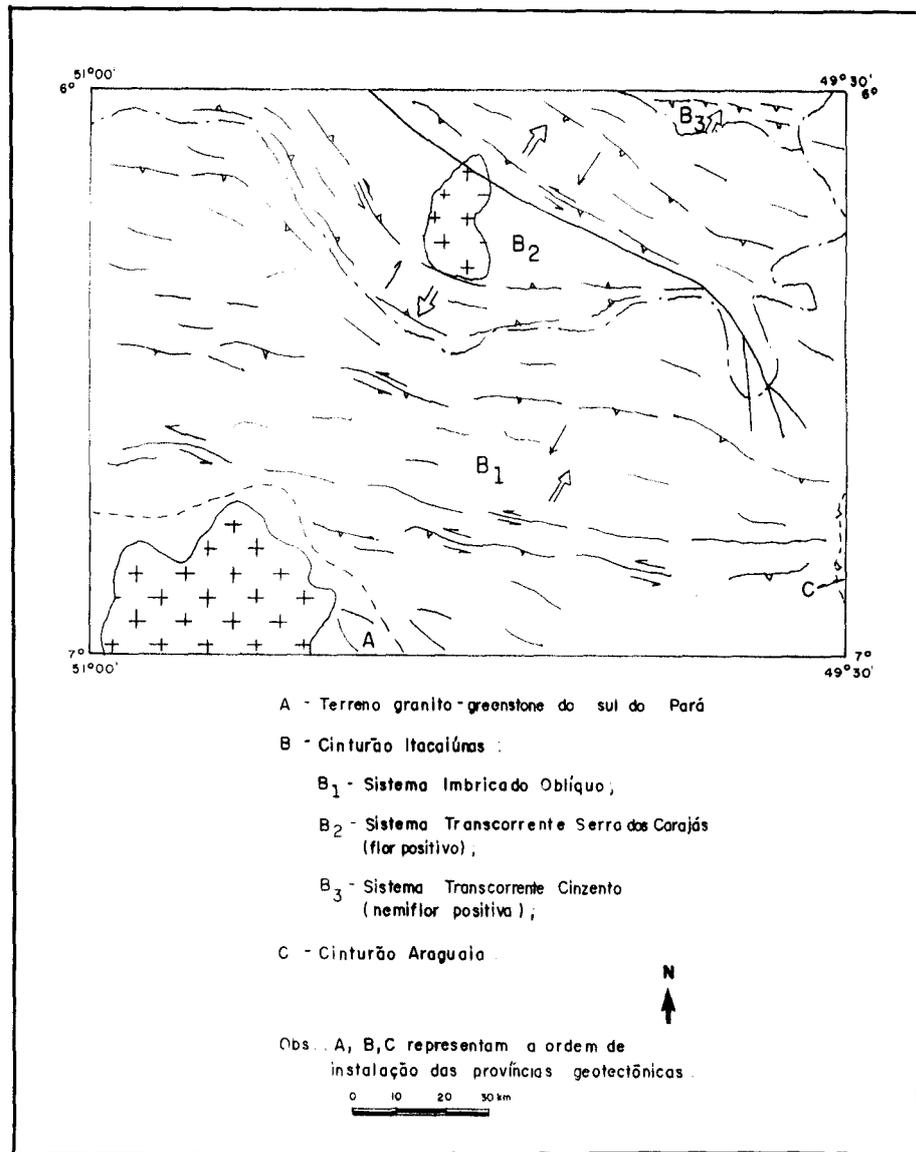


Fig. 2.6 - Mapa estrutural simplificado exibindo o terreno granito-*greenstone* do sul do Pará e os Cinturões Itacaiúnas e Araguaia.

FONTE: CPRM (1991), p. 20

O **domínio imbricado**, ocupando a parte sul da Folha Serra das Carajás está ligado a uma cinemática compressiva, representada por sistemas imbricados de cavalgamentos oblíquos. Esse domínio é caracterizado pela lenticularização generalizada das unidades rochosas dos complexos Xingu e Pium, Grupo Sapucaia e granito estratóide Plaqué. Ao arranjo lenticularizado das unidades litológicas, associa-se zonas de cisalhamento, com movimentação sinistral e orientação geral E-W. Estas zonas de cisa-

lhamento coincidem com os limites entre os principais conjuntos litológicos e, definem o sistema imbricado. Através das lineações de estiramento impressas nas rochas situadas no domínio imbricado, verifica-se que o transporte das massas rochosas foi, preferencialmente, de SW para NE (CPRM, 1991) (Figura 2.7).

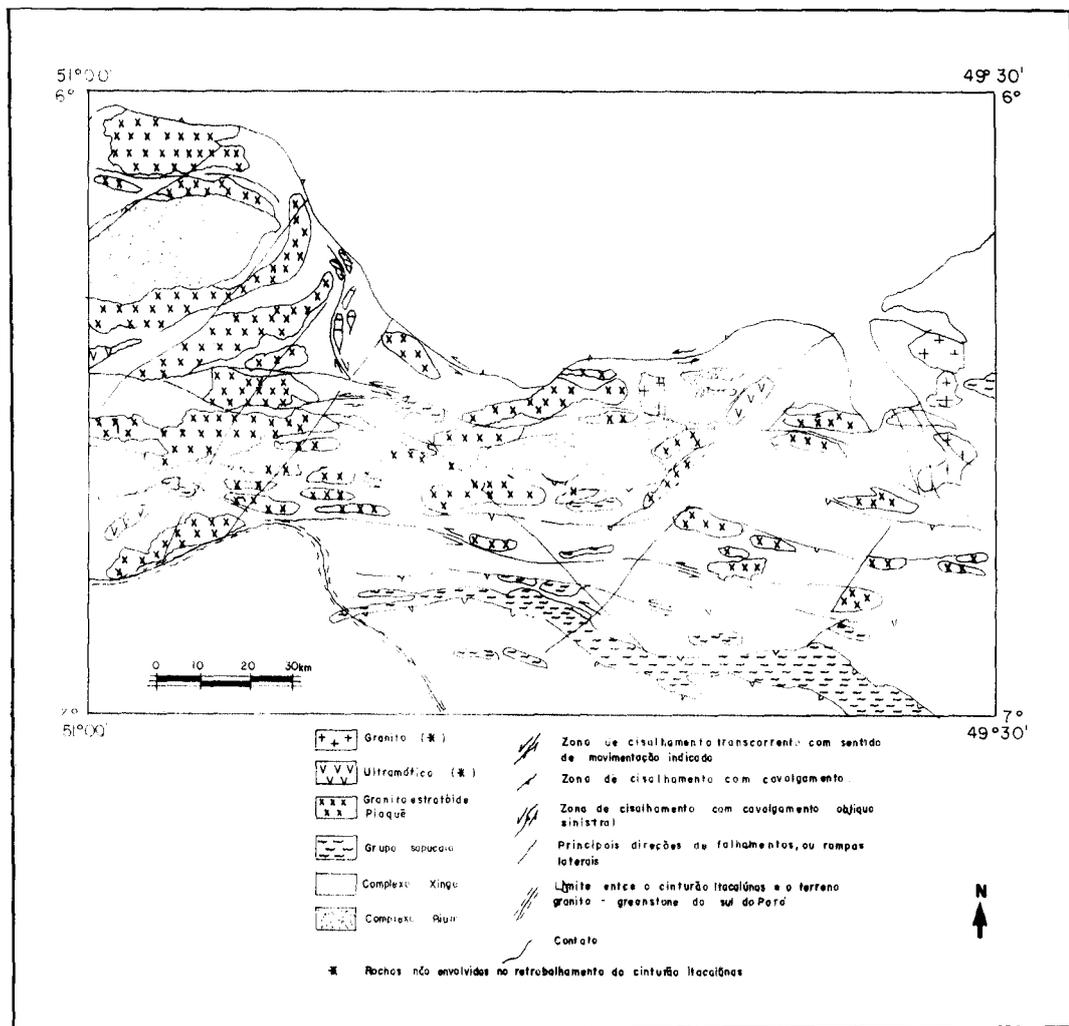


Fig. 2.7 - Cinturão Itacaiúnas - domínio imbricado (distribuição das unidades litoestratigráficas e arranjo estrutural simplificado).

FONTE: CPRM (1991), p. 23.

O **domínio transcorrente**, situado na parte norte da área, é caracterizado por zonas de cisalhamento dúcteis que apresentam um padrão lenticularizado (sigmoidal) de direção geral WNW-ESE. Esse domínio estrutural, que engloba as rochas

pertencentes aos grupos Igarapé Pojuca, Grão Pará e Rio Fresco, está dividido em dois sistemas transcorrentes sinistrais: o **Serra dos Carajás** e o **Cinzeno**.

O sistema transcorrente **Serra dos Carajás** compreende um feixe divergente de zonas de cavalgamento, que variam de verticais a suavemente inclinadas do centro para a borda. Estas zonas de cisalhamento que compõem a estrutura em flor positiva (Araújo et al., 1988), são essencialmente oblíquas e fazem parte de um domínio transcorrente maior (Figura 2.8).

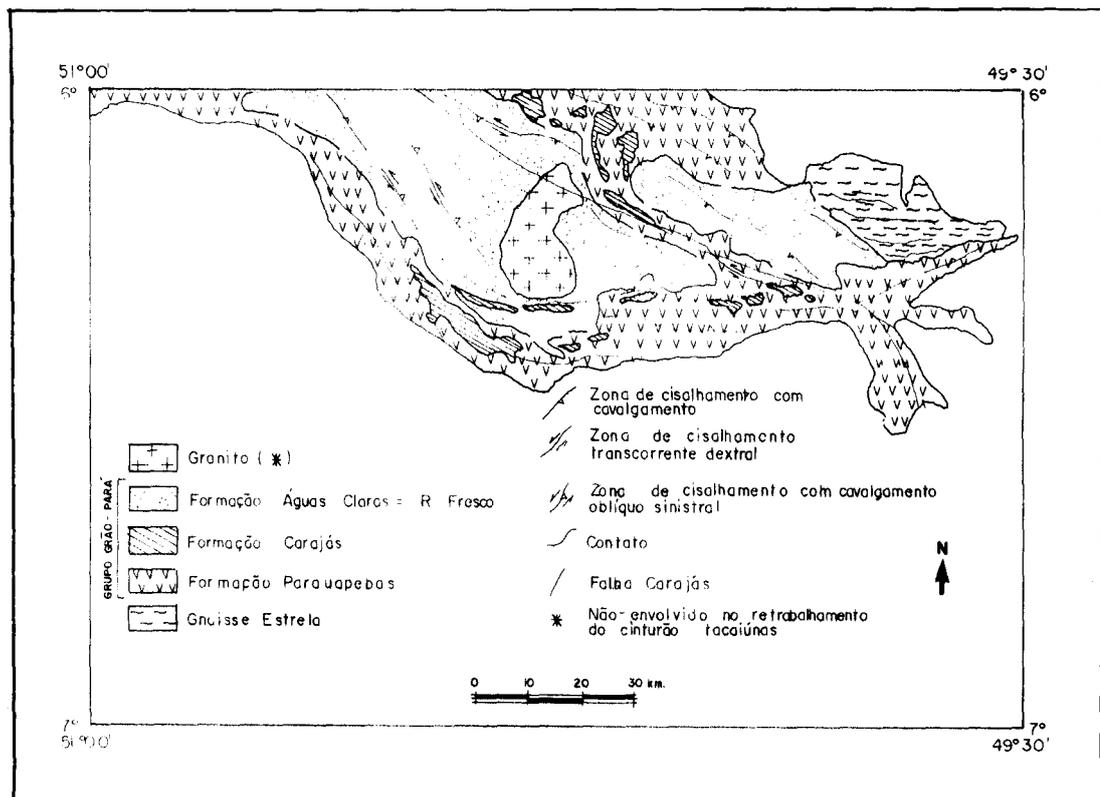


Fig. 2.8 - Cinturão Itacaiúnas - domínio transcorrente definido pelo sistema Serra dos Carajás (distribuição das unidades litoestratigráficas e arranjo estrutural simplificado).

FONTE: CPRM (1991), p. 31.

O sistema transcorrente **Cinzeno** é caracterizado por uma estrutura sigmoidal formada por zonas de cavalgamento oblíquo NE-SW, que divergem a partir de uma zona transcorrente principal. Siqueira (1990) caracterizou esse sistema

transcorrente e demonstrou a existência de feições tipo duplex ao longo de sua direção, cuja história cinemática envolveu uma transtensão seguida de uma transpressão.

A estruturação relacionada ao Proterozóico na região, é definida por vários feixes de lineamentos orientados preferencialmente nas direções NW-SE e NE-SW, que impõem modificações na geometria dos elementos estruturais antigos. Os lineamentos NE-SW correspondem a falhas de transferência, que podem incorporar movimentação dextral ou sinistral. Como um lineamento estrutural NW-SE, destaca-se a Falha Carajás (Silva et al., 1974) com movimento sinistral. Também definidas por Silva et al. (1974) ocorrem as falhas Floresta e Candless sinistras com direção principal NE-SW.

Relacionado à estruturação fanerozóica, destacam-se as intrusões básicas que se alojaram em zonas de fraquezas antigas reativadas. Sabe-se também que no Paleogeno/Neogeno formaram-se desnivelamentos expressivos de blocos, proporcionando a instalação das principais feições morfológicas da região.

## **2.4 - CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DA FOLHA SERRA DOS CARAJÁS**

A Folha Serra dos Carajás pertence ao domínio do PGBC, levantamento aerogeofísico realizado entre 1975/76. Esse aerolevamento geofísico (magnético e gamaespectrométrico) gerou uma grande quantidade de informação, que vem sendo analisada, através de mapas de contornos, visando sua aplicação em geociências.

Marinho e Azevedo (1986) interpretaram os mapas de contornos radiométricos originais (U, Th e CT) da Folha Serra dos Carajás (SB.22-Z-A-II, escala 1:100.000). Eles constataram, que nesta folha destacam-se com elevados níveis radiométricos: 1) o Granito Serra dos Carajás, associado aos canais U, Th e CT; 2) o Grupo Grão Pará, associado apenas ao canal Th e; 3) alguns corpos dentro do Complexo Xingu, provavelmente, núcleos graníticos.

CPRM (1991) realizou a interpretação geofísica qualitativa da Folha Serra dos Carajás (SB.22-Z-A, escala 1:250.000), sobre os mapas de contornos magnéticos (campo total) e radiométricos (U, Th e CT), gerados pelo PGBC. Além destes, foram também utilizados outros mapas magnéticos, como: gradiente vertical com

redução ao polo e de continuação para cima. Nesse trabalho foram definidos domínios e subdomínios magnéticos, que foram correlacionados com feições radiométricas, estruturais, informações geológicas, imagens de radar e satélites (Figura 2.9). Os mapas de contornos magnéticos, de modo geral, deram informações como: 1) definições de contato de rochas máficas e ultramáficas, 2) localização de diques básicos e 3) presença de alinhamentos, preferencialmente, orientados segundo as direções: E-W, NE-SW e NW-SE.

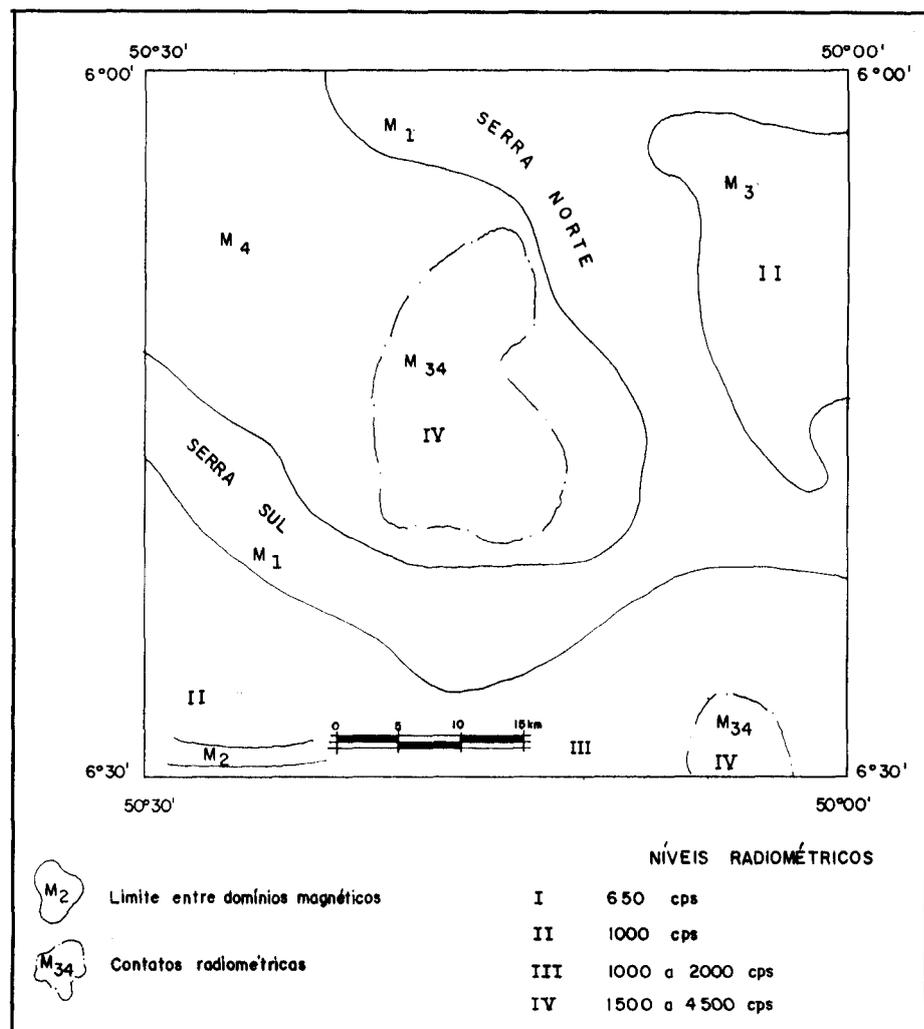


Fig. 2.9 - Mapa de interpretação radiométrica e magnética da Folha Serra dos Carajás.

FONTE: Extraída de CPRM (1991), p. 72.

Os mapas de contornos radiométricos permitiram: 1) definições de contatos de rochas de natureza ácida, evidenciando corpos com aspecto lenticularizado, orientados segundo a direção E-W e; 2) identificação de alinhamentos orientados segundo as direções: E-W, NE-SW e NW-SE. Os alinhamentos E-W encontram-se com maior frequência na parte central da área, definindo importantes zonas de cisalhamento. Ainda, cabe ressaltar que os alinhamentos magnéticos e radiométricos não coincidem espacialmente, já que estão associados a litologias de naturezas distintas.

A partir das informações compiladas no trabalho CPRM (1991), pôde-se estabelecer a Tabela 2.1, que caracteriza, através dos níveis radiométricos do canal contagem total (CT), algumas das principais unidades litológicas da presente área de estudo.

Cabe, ainda algumas informações, no que diz respeito aos níveis radiométricos das unidades Formação Águas Claras (ou Gr. Rio Fresco) e Suíte Plaquê. A Formação Águas Claras (Gr. Rio Fresco) com níveis radiométricos inferiores a 500cps (CT), apresenta baixos níveis radiométricos frequentes quando ocorre associada as formações ferríferas. A Suíte Plaquê, apresenta corpos lenticularizados orientados segundo a direção E-W, com níveis radiométricos de 15 a 25 ppm (canal do tório); 2.5 a 8.0 ppm (canal do urânio) e 1.000 e 2.000 cps (canal da contagem total). As indicações dos teores de eTh e eU foram obtidos da conversão das contagens por segundo (cps). Não foi utilizada a informação referente ao canal do potássio, porque tal informação não estava disponível.

**TABELA 2.1 - NÍVEIS RADIOMÉTRICOS (CT) DE ALGUMAS UNIDADES LITOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO**

UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	LITÓTIPOS	NÍVEIS RADIOMÉTRICOS (CPS)
Complexo Xingu	gnaisses granodioríticos migmatizados gnaisses graníticos rochas tonalíticas	500 - 1000 500 - 1000 < 500
Complexo Pium	litótipos (geral) porções enderbíticas conjuntos charnockíticos	< 500 < 1000 > 1000
Grupo Sapucaia	litótipos (geral)	< 500 e 300
Suíte Plaquê	rochas graníticas rochas menos potássicas	1000 (média) 500
Grupo Grão Pará	Fm. Parauapebas (geral) Fm. Parauapebas (porções ácidas) Fm. Ferrífera Bandada Metarenitos conglom. subarcoseanos Metassiltitos e metargilitos	> 500 > 1000 < 500 > 500 > 500
Suíte Granítica Anorogênica	Granito Central Serra dos Carajás	1000 - 2000

## 2.5 - CARACTERIZAÇÃO GEOBOTÂNICA DA ÁREA DO POJUCA

Para a Área do Pojuca, Paradella et al. (1994) através do uso de dados digitais TM/Landsat e modelo de elevação, apoiados em verificações geológicas e botânicas, identificaram nove classes geobotânicas (Figura 2.10). A investigação mostrou que a cobertura vegetal na área é principalmente controlada pela elevação e declividade, as quais refletem variações na geologia. As verificações botânicas indicaram que a densidade e estratificação vegetal seriam os mais importantes atributos que controlam as respostas detectadas pelo TM/Landsat.

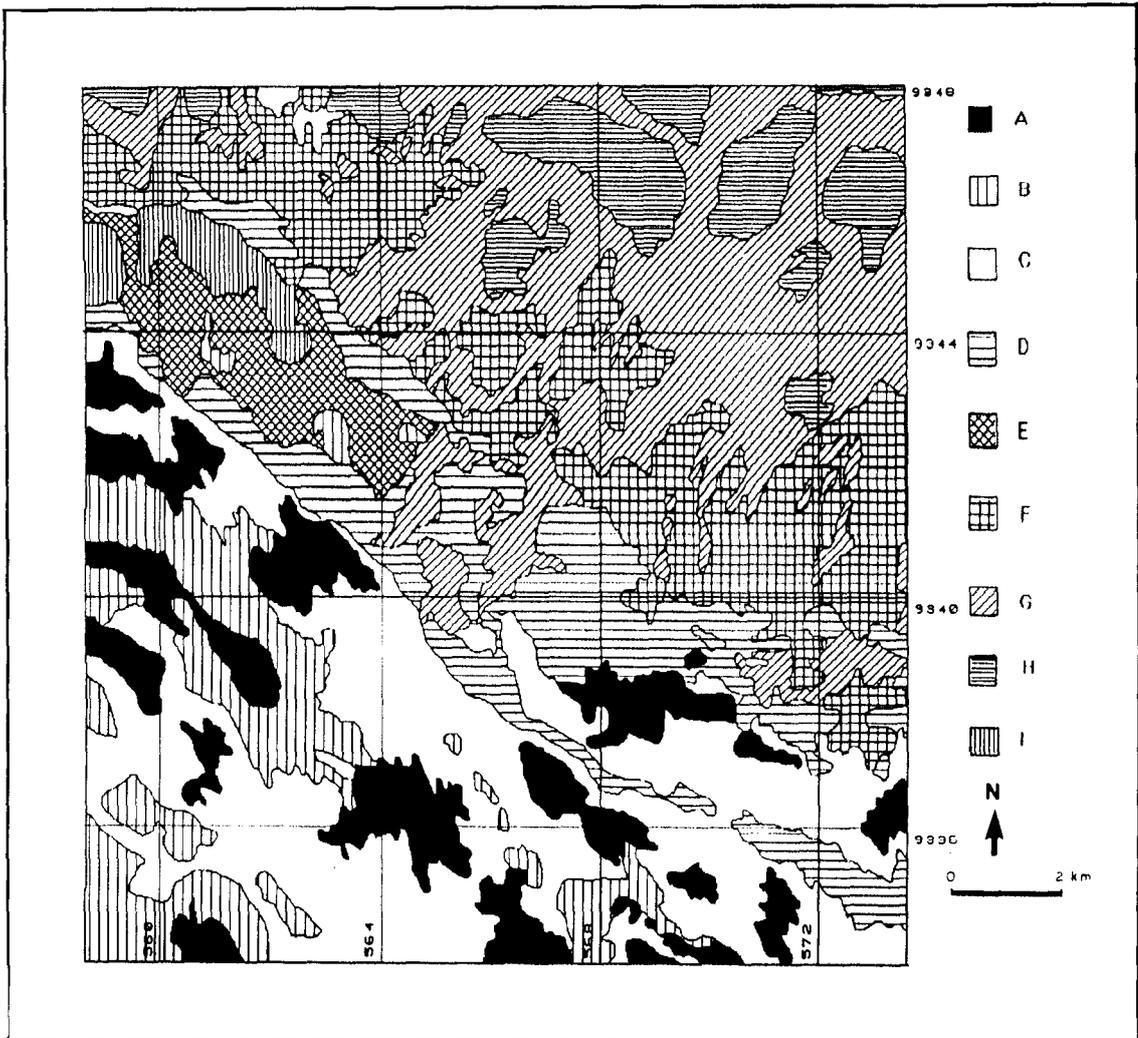


Fig. 2.10 - Mapa de classes geobotânicas.

FONTE: Paradella et al. (1994), p. 1641.

A seguir será caracterizada a cobertura vegetal (Figura 2.11) associada as classes de A a G. As demais classes (H, I e J) não possuem descrições botânicas.

**Classe A** - Floresta Equatorial Ombrófila Alta Densa associada com as altitudes (platôs); árvores com copas fechadas, altura do dossel variando entre 25 e 30 m; topo do dossel levemente plano; ausência de bambus e poucos cipós. Esta classe estaria associada aos platôs elevados com lateritas;

- Classe B** - Floresta Equatorial Ombrófila Densa, sendo comum a presença de cipós nas copas das árvores; dossel muito irregular com variação de altura próxima a 25 m; presença de espécies emergentes de 30 m de altura. Esta classe estaria relacionada com relevos arredondados a suavemente ondulados do Grupo Rio Fresco;
- Classe C** - Floresta Equatorial Ombrófila Densa com variação de densidade ligeiramente inferior a da classe anterior; dossel mais irregular; indivíduos arbóreos com altura próxima a 30 m; presença de cipós; poucas emergentes e esporádicas clareiras naturais com bambus. Esta classe estaria associada com o relevo mais acidentado do Grupo Rio Fresco;
- Classe D** - Floresta Equatorial Ombrófila Aberta caracterizada pela presença de um estrato dominante com 10 a 15 m de altura e presença de sub-bosque com cipós e bambus. Esta classe relaciona-se com as rochas do Grupo Igarapé Pojuca;
- Classe E** - Vegetação tipo Savana (cerrado amazônico) caracterizada por uma biomassa baixa com clareiras naturais associadas às exposições de solo ou afloramentos de rochas. Esta classe está associada ao granito tipo Carajás;
- Classe F** - Floresta Equatorial Ombrófila Aberta (Floresta Mista) com estratificações dadas por emergentes com altura entorno de 35 m; dossel arbóreo com 25 m de altura e presença de sub-bosque com 10 m de altura; clareiras naturais. Esta classe correlaciona-se às rochas gnáissicas/migmatítica do Complexo Xingu;
- Classe G** - Floresta de baixio com predominância de palmeiras. Indica áreas com excesso de umidade, principalmente drenagens ou áreas alagadas. O dossel geralmente irregular, mas em locais onde não ocorrem clareiras naturais, o dossel com emergentes representa o mais importante estrato de biomassa. Tal classe estaria associada com as coberturas aluvionares recentes.

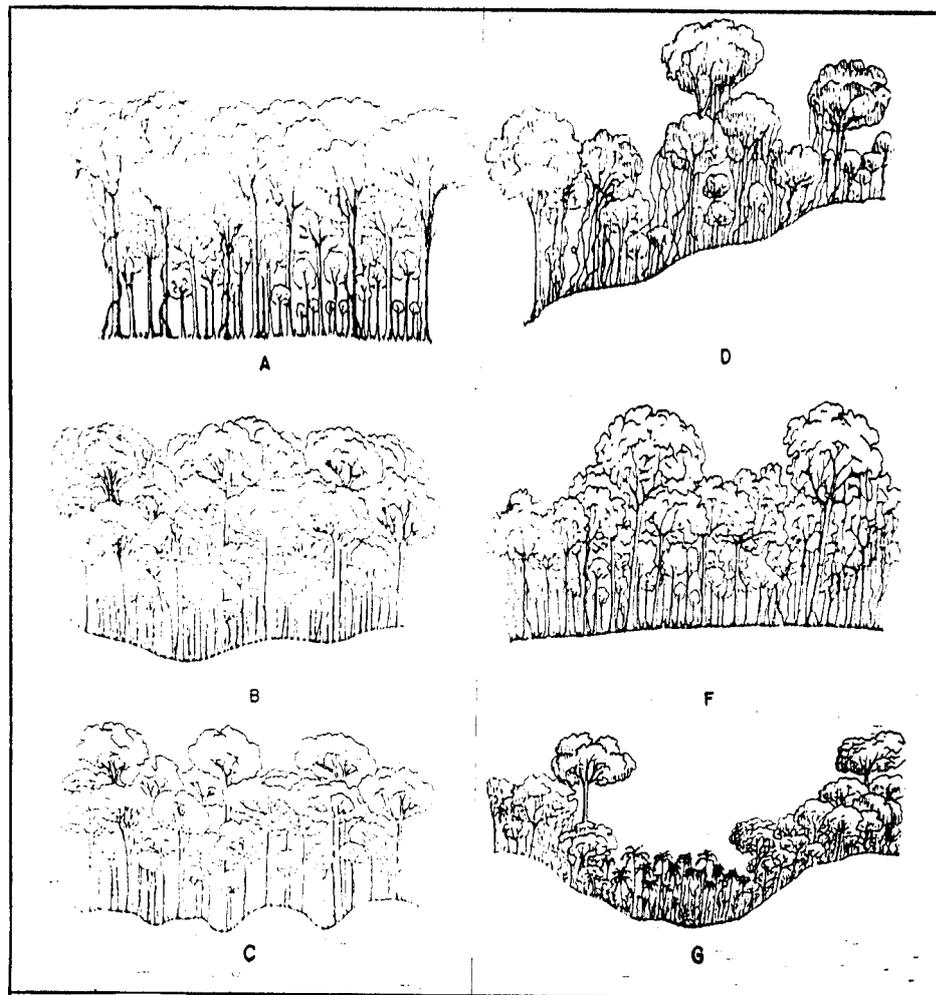


Fig. 2.11 - Representação esquemática dos tipos de vegetação associados às classes geobotânicas

FONTE: Paradella et al. (1994), p. 1645 e 1646.

## CAPÍTULO 3

### GEOFÍSICA NUCLEAR

#### 3.1 - RADIOATIVIDADE - PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Com o desenvolvimento da Física Nuclear, ocorreu uma evolução nas técnicas de medição das radiações nucleares associadas às radioatividades natural e artificial, na atmosfera, hidrosfera e litosfera. Esse progresso das técnicas de detecção das radiações nucleares culminou no surgimento da Geofísica Nuclear, ciência situada entre a Física Nuclear e a Geociências (Nordemann e Pereira, 1984).

Quando em geologia medem-se as transformações e radiações nucleares e, as interações dessas radiações com a matéria, tais observações são denominadas de métodos de geofísica nuclear. Esses métodos envolvem tanto medições da radioatividade natural como dos campos de radiação nuclear induzidos (Matolín, 1984).

Os métodos de medição da radioatividade natural, que são chamados de métodos radiométricos, dividem-se, dependendo do tipo de radiação, em: métodos **alfa**, **beta** e **gama** ou, de acordo com o tipo de técnica, em medição da **atividade total** e **espectrometria**. Nas geociências, a aplicação dos métodos de geofísica nuclear englobam a geocronologia, o mapeamento geológico, a petrologia, a geologia de prospecção, etc.

A partir de uma visão bastante abrangente e, em consequência, não muito aprofundada, pretende-se descrever nesse capítulo: a radioatividade natural, as características da radiação gama, as grandezas físicas, a radioatividade de alguns tipos de rochas e a aerogamaespectrometria.

Foram utilizadas como referências básicas para a descrição dos princípios fundamentais da radioatividade natural, os seguintes autores: Kaplan (1963), Lapp e Andrews (1963), Price (1964), Knoll (1979) e Matolín (1984).

A radioatividade natural foi descoberta por Becquerel, em 1896, ao observar experimentalmente que sais de urânio emitiam radiações penetrativas. Mais tarde, Rutherford e Soddy, investigando o fenômeno descoberto por Becquerel, descobriram que a radioatividade natural podia ser explicada, assumindo-se que os átomos radioativos não eram estáveis e que se desintegravam para formar novos átomos de outros elementos. Tais implicações puderam ser comprovadas por Rutherford, que demonstrou experimentalmente, a partir de algumas substâncias, a emissão de radiações nucleares de três tipos diferentes, chamadas de alfa, beta e gama.

Entende-se por **radioatividade**, as transformações nucleares (desintegrações) acompanhadas da emissão de partículas ou energias características da instabilidade do núcleo de determinados elementos. Neste processo, o átomo original transforma-se em um novo elemento, que por sua vez, poderá ser ou não radioativo. Os **elementos radioativos** são, também, denominados de radioelementos, radioisótopos ou radionuclídeos.

A desintegração de um radionuclídeo é um processo estatístico, no qual a probabilidade de um átomo radioativo desintegrar-se é igual para todos os átomos de uma mesma espécie. A desintegração ou não de um radionuclídeo, independe de sua vida anterior e o número de átomos que se desintegram durante pequenos intervalos idênticos de tempo, não é o mesmo. Essas considerações definem a chamada **lei da desintegração radioativa**.

De acordo com a lei da desintegração radioativa, um radionuclídeo pode ser caracterizado por qualquer uma das três grandezas: **constante de desintegração**, **meia vida** ou **tempo de semi-desintegração e vida média**.

A **constante de desintegração** representa a relação entre o decréscimo do número de átomos iniciais de um radionuclídeo por unidade de tempo. A **meia vida** ou **tempo de semi-desintegração** é definida como o intervalo de tempo necessário para o decaimento de metade dos átomos iniciais de uma substância radioativa, ao passo que a **vida média** é o tempo de duração médio de um núcleo radioativo.

Os decaimentos radioativos (desintegrações) permitem a divisão dos radionuclídeos em dois grupos: um que forma séries naturais de decaimento e outro, cujos primeiros produtos de decaimento são estáveis.

Nas séries naturais de decaimento, os radioelementos vão se transformando em cadeia espontaneamente segundo meias vidas distintas, até que o último elemento obtido seja estável. Os radionuclídeos que formam séries ou famílias radioativas agrupam-se em três séries: **série do urânio** ( $^{238}\text{U}$ ), **série do tório** ( $^{232}\text{Th}$ ) e **série do actínio-urânio** ( $^{235}\text{U}$ ). Estas séries têm como produtos estáveis, respectivamente, os seguintes isótopos de chumbo:  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ .

Os decaimentos radioativos das três séries anteriores podem ser expressas como:



O grupo de radionuclídeos, cujos primeiros produtos de decaimento são estáveis, compreende o potássio ( $^{40}\text{K}$ ), o cálcio ( $^{48}\text{Ca}$ ), o rubídio ( $^{87}\text{Rb}$ ), zircônio ( $^{96}\text{Zr}$ ), etc.. Entre tais radionuclídeos, o potássio ( $^{40}\text{K}$ ) é o mais importante devido à sua atividade radioativa e presença em rochas.

O potássio ( $^{40}\text{K}$ ) decai de uma forma regular para o argônio ( $^{40}\text{Ar}$ ) e o cálcio ( $^{40}\text{Ca}$ ). O decaimento do  $^{40}\text{K}$  (89%) para formar átomos de  $^{40}\text{Ca}$  ocorre, através da emissão de uma partícula beta, enquanto os 11% remanescentes desintegram-se pela captura de elétrons, para formar átomos de  $^{40}\text{Ar}$ , com a emissão de um simples fóton gama com energia de 1,46 MeV.

O fluxo de partículas carregadas, nêutrons ou quanta de energia que acompanham as transformações nucleares dos radioelementos constituem as **radiações nucleares**.

As radiações nucleares alfa, beta e gama emitidas, durante o decaimento do número e massa atômicos dos elementos radioativos, possuem constituição e características muito distintas entre si, que permitem suas detecções diferenciadas.

A radiação alfa caracteriza-se pelo fluxo de partículas carregadas positivamente (núcleo de hélio). Neste decaimento, cada vez que uma partícula é emitida por um átomo radioativo, o núcleo decresce de duas unidades de carga e quatro unidades de massa, transformando-se em um novo átomo. Esse processo de decaimento é expresso de maneira geral, para qualquer elemento com número atômico ( $Z$ ) e massa atômica ( $A$ ) como:



A radiação beta é o fluxo de partículas carregadas negativamente (elétrons). Nesse tipo de decaimento, cada vez que uma partícula é emitida por um elemento radioativo, seu número atômico ( $Z$ ) aumenta de uma unidade e sua massa atômica ( $A$ ) permanece praticamente igual. Esse decaimento é dado por:



A radiação gama é caracterizada pela emissão de raios gama, que são produzidos por um isótopo radioativo que volta de um estado excitado de maior energia para um estado de menor energia ou fundamental. Esse tipo de radiação, geralmente, segue as emissões de partículas alfa e beta.

### 3.1.1 - RADIAÇÃO GAMA

A radiação gama, de origem nuclear e semelhante aos raios X, é uma radiação eletromagnética de natureza ondulatória-corpúscular com velocidade de propagação igual à da luz.

A emissão de raios gama caracteriza essa radiação, que é um processo de reajuste energético. Quando uma partícula é emitida por um núcleo radioativo que se desintegra, este alcança um estado de maior energia que o fundamental, denominado de estado excitado de energia. Então, é através da emissão de raios gama, transição

espontânea sem qualquer interação externa, que o núcleo radioativo volta do estado excitado de energia para um estado de menor energia ou para o fundamental.

Os raios gama, acompanhando um tipo particular de reação nuclear, são compostos por fótons, cada um com energia  $E$  definida pela expressão:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c \cdot \lambda^{-1}, \quad (3.6)$$

onde:  $h$  é a constante de Planck igual a  $6,6256 \cdot 10^{-34}$  Js

$c$  é a velocidade da luz;

$\nu$  é a frequência da onda da radiação eletromagnética;

$\lambda$  é o comprimento de onda da radiação eletromagnética.

A radiação gama é caracterizada por uma faixa de frequência entre  $3 \cdot 10^{18}$  e  $3 \cdot 10^{22}$  Hz, correspondendo, portanto, a curtíssimos comprimentos de onda que vão desde cerca de  $10^{-10}$  a  $10^{-14}$  m. Assim, a energia dos fótons vai de  $10^4$  a  $10^7$  eV.

### 3.1.2 - GRANDEZAS FÍSICAS

As grandezas usadas em Física Nuclear são dadas em unidades do Sistema Internacional (SI). Alguns resultados obtidos pelos métodos nucleares aplicados à geologia são expressos por unidades subsidiárias. Essas unidades subsidiárias correspondem aos múltiplos do elétron-volt: o kiloeletron-volt (keV), o megaeletron-volt (MeV) e o gigaeletron-volt (GeV).

As grandezas físicas, símbolos e unidades usados em radiometria de raios gama estão listadas na Tabela 3.1, enquanto suas definições encontram-se no Apêndice A.

TABELA 3.1 - SÍMBOLOS E UNIDADES USADOS EM RADIOMETRIA

Grandezas	Símbolo	Unidade
Atividade	A	becquerel (Bq)
Ativ. Específica	a	becq/kilog.(Bqkg <sup>-1</sup> )
Exposição radioativa	X	coulomb/kilog.(Ckg <sup>-1</sup> )
Taxa de exposição	X	ampère/kilog.(Akg <sup>-1</sup> )
Dose de energia	D	gray (Gy)
Energia da radiação	E	elétron-volt (eV)
Emissão da fonte	$\Phi_n$	unidade/seg.(s <sup>-1</sup> )
Fluxo de partícula	$\Phi$	por metro <sup>2</sup> (m <sup>-2</sup> )
Elemento:		
em rocha		percentagem (%) partes por milhão (ppm)
em gás		becquerel/litro (Bql <sup>-1</sup> )

FONTE: Extraída de Matolín (1984), p.15

### 3.2 - RADIOATIVIDADE DE ROCHAS

Os elementos radioativos naturais presentes na crosta terrestre são a causa da radioatividade nas rochas, água e ar. Existem mais de 200 tipos de núcleos atômicos radioativos, mas os mais importantes contidos em rochas que originam a radiação gama são: o potássio (<sup>40</sup>K), o tório (<sup>232</sup>Th) e o urânio (<sup>238</sup>U), que se concentram próximo à superfície.

O mais abundante dos três radioelementos naturais é o potássio (<sup>40</sup>K), que é encontrado principalmente em feldspatos potássicos, micas, leucitas e nefelinas, resultando em uma concentração média na crosta terrestre de 2,5%.

O urânio (<sup>238</sup>U) e o tório (<sup>232</sup>Th) podem ser encontrados em quantidades traço em minerais principais, tais como o quartzo e os feldspatos. Esses radioelementos, geralmente, são encontrados em concentrações maiores em pequenos grãos de minerais acessórios como o zircão, esfeno, epidoto, monazita, xenotima etc. A presença dos dois radioelementos <sup>238</sup>U e <sup>232</sup>Th, em minerais primários, corresponde as concentrações médias na crosta terrestre de 2 a 4 ppm e 8 a 12 ppm, respectivamente (Galbraith e

Saunders, 1983; Matolín, 1984).

Kogan et al. (1971); Galbraith e Saunders (1983) e Matolín (1984) apresentam uma compilação de trabalhos anteriores enfatizando o comportamento e a distribuição dos radioelementos potássio, urânio e tório em rochas. De acordo com esses autores, a variação da concentração dos radioelementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em rochas, deve-se às diferenças quanto: (1) à gênese dos tipos rochosos, (2) ao comportamento geoquímico dos radionuclídeos e (3) aos processos de intemperismo que controlam a distribuição superficial.

Como o potássio ( $^{40}\text{K}$ ) tem um comportamento geoquímico bem conhecido, deve-se considerar como detalhes importantes: o metassomatismo de sódio, que acompanha certos tipos de mineralização de urânio e a substituição do potássio pelo sódio, durante a formação de minerais. Essas duas observações são importantes, porque elevam a razão U/K, quando ocorre uma significativa mineralização de urânio.

Em **rochas ígneas**, a maior ou menor concentração dos radioelementos urânio e tório, deve-se à compatibilidade estrutural dos íons  $\text{U}^{+4}$  e  $\text{Th}^{+4}$  com as fases minerais de cada estágio de diferenciação magmática. Desta forma, o conteúdo dos radioelementos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  dos minerais acessórios é controlado pela composição química dos magmas e pelas condições de diferenciação magmática.

Durante a cristalização de magmas básicos, as concentrações dos radioelementos urânio e tório são muito baixas. Contudo, nos últimos estágios de diferenciação magmática, estágios responsáveis pela formação de rochas ácidas, as concentrações dos elementos urânio e tório tornam-se mais elevadas. Tais observações, demonstram que a radioatividade das rochas ígneas tende a aumentar com a acidez dos magmas, ou seja, com o aumento de  $\text{SiO}_2$ .

Vários autores têm demonstrado que existem fortes correlações entre os três radioelementos potássio, urânio e tório, em rochas ígneas. Observa-se, além do aumento de urânio e tório de rochas básicas para ácidas, um aumento significativo da concentração de tório com o aumento do conteúdo de potássio (Tabela 3.2). Essas correlações positivas que ocorrem com  $\text{SiO}_2$  e, ambos, U e Th e,  $\text{K}_2\text{O}$  e Th são caracterizadas por padrões não lineares.

**TABELA 3.2 - CONTEÚDO NATURAL MÉDIO DE K, U E Th EM ROCHAS ÍGNEAS**

ROCHAS	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)
Ultrabásicas	0,02	0,007	0,01
Básicas	3,4	0,8	1,0
Básicas - Intermediárias	6,1	1,7	1,9
Intermediárias	9,8	3,0	2,4
Intermediárias - Ácidas	16,0	3,6	3,0
Ácidas	21,9	4,1	3,5

FONTE: Adaptada de Galbraith e Saunders (1983), p. 55; Matolín (1984), p.178.

Geralmente, as concentrações dos elementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em rochas ígneas diferem significativamente dos conteúdos médios apresentados na Tabela 3.2, no entanto, como regra geral, a dependência da acidez é conservada.

Em relação às **rochas sedimentares** deve ser considerado como fatores importantes a mobilidade do urânio e a insolubilidade do tório, juntamente com o transporte de sedimentos.

O urânio devido à sua maior mobilidade, consequência de sua facilidade de oxidação, pode ser transportado juntamente com sedimentos por ação mecânica, ou ser dissolvido em águas superficiais ou subterrâneas. Quando, o urânio está presente em solução, ele migra dentro da bacia de sedimentação, comumente na forma de compostos complexos como uranila ( $\text{UO}_2^{++}$ ) com carbonatos, sulfatos e íons cloreto. Em condições favoráveis, ambientes redutores (rico em matéria orgânica), esses compostos de urânio são precipitados enriquecendo epigeneticamente os sedimentos.

Os compostos de tório são praticamente insolúveis. Eles podem permanecer no local onde as rochas sofreram intemperismo ou serem transportados por águas correntes. Quando os compostos permanecem *in situ*, o tório torna-se seletivamente mais concentrado em lateritas e materiais residuais como argilas e resistatos pesa-

dos (monazita, zircão, xenotima etc.). Por outro lado, quando os compostos de tório juntamente com outros sedimentos, são transportados por águas correntes, eles podem ser acumulados por deposição gravitacional, originando algumas vezes, elevadas taxas de concentração em depósitos do tipo *placer*.

Considerando as observações anteriores, conclui-se que a radioatividade das rochas sedimentares relaciona-se, principalmente, ao material que está sendo depositado. Por esta razão, as concentrações de U e Th em rochas sedimentares são muito variadas (Tabela 3.3).

**TABELA 3.3 - CONTEÚDO NATURAL MÉDIO DE K, U E Th EM ROCHAS SEDIMENTARES**

ROCHAS	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)
Carbonatos Areni- tos	1,6	1,6	0,3
	5,7	1,9	1,2
Folhelhos, argilas	11,2	3,7	2,7
Calcários	1,8	1,4	0,3

FONTE: Adaptada de Galbraith e Saunders (1983), p. 55; Matolín (1984), p.179.

Conforme a Tabela 3.3, as mais altas atividades radioativas apresentadas pelas rochas sedimentares devem-se aos folhelhos e argilas. Os calcários, dolomitos e arenitos, como regra geral, são fracamente ativos quando puros, porque os elementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  não entram facilmente na composição química dessas rochas.

A radioatividade das **rochas metamórficas** corresponde, predominantemente, às propriedades do material de origem. Em alguns pulsos de metamorfismo, a radioatividade desse grupo de rochas pode ser realçada ou reduzida, dependendo da natureza do fluido envolvido nos processos de metamorfismo.

Alguns ortognaisses e migmatitos exibem claramente alta radioatividade, enquanto anfibolitos, serpentinitos e alguns granulitos são distinguidos pela atividade extremamente baixa (Tabela 3.4).

**TABELA 3.4 - CONTEÚDO NATURAL MÉDIO DE K, U E Th EM ROCHAS METAMÓRFICAS**

ROCHAS	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)
Anfibolitos	2,0	0,9	0,6
Gnaisses	10,6	2,3	3,4
Xistos	13,5	4,1	2,5
Mármore	1,8	1,1	0,4

FONTE: Adaptada de Galbraith e Saunders (1983), p. 55; Matolín (1984), p. 179.

### 3.3 - AEROGAMAESPECTROMETRIA - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aerogamaespectrometria envolve o uso de sistemas de detecção de radiação, montados a bordo de aeronaves, que medem e registram o fluxo de raios gama originado dos radioelementos  $^{40}\text{K}$  e membros das séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , que estão concentrados em materiais situados próximo à superfície terrestre.

A espectrometria aérea de raios gama é largamente usada como ferramenta (IAEA, 1979; Minty, 1992), na prospecção de materiais radioativos, mapeamento e definição de estruturas geológicas, determinação de linhas de falhas e, em condições favoráveis, adequada na exploração de materiais não radioativos. A principal vantagem desses levantamentos aéreos é a obtenção de uma grande quantidade de dados, concentrações terrestres (ppm,%) dos radioelementos, em curtos períodos de tempo, desde que sejam corretamente realizadas as calibrações dos espectrômetros aéreos em *pads*.

Os dados dos aerolevantamentos gamaespectrométricos são coletados segundo linhas de vôos (perfis) paralelas entre si, regularmente espaçadas e trans-

versais à direção das litologias, para melhor definir os contatos entre unidades distintas (Figura 3.1).

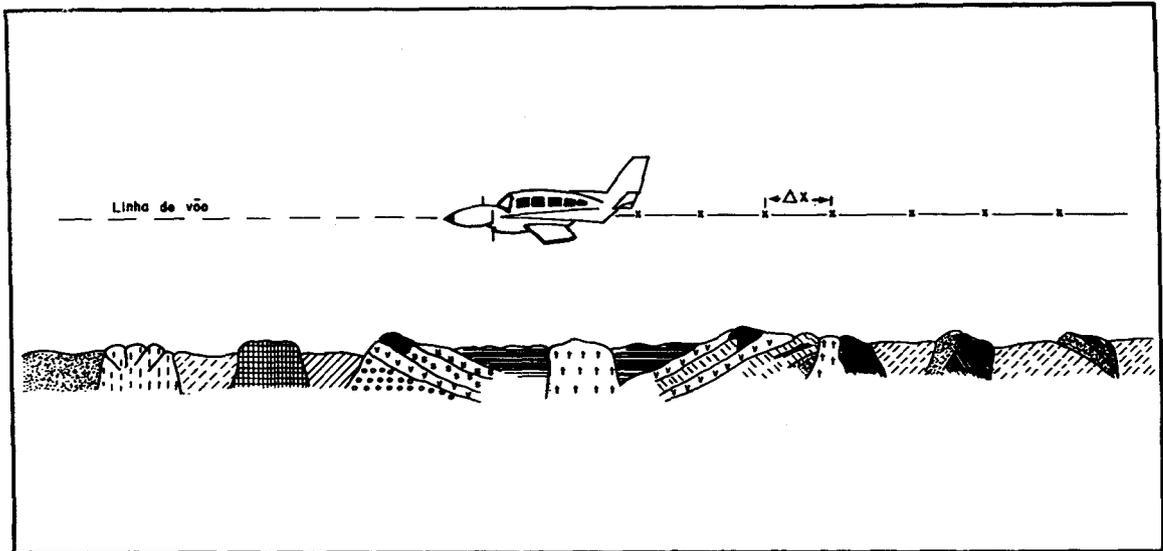


Fig. 3.1 - Representação esquemática da coleta aérea de dados aéreos de raios gama, em relação à direção das litologias. Os índices,  $x$  e  $\Delta x$  equivalem ao ponto amostrado e ao intervalo de amostragem, respectivamente.

Nesses levantamentos aéreos de raios gama, as emissões gama naturais são registradas em termos de contagens por segundo (cps), utilizando-se o intervalo de 0 a 3 MeV (mega-elétronvolts). Nessa região espectral estão definidas quatro intervalos (janelas) de energia (Tabela 3.5). Em três janelas, os picos em 1.46, 1.76 e 2.62 MeV representam o  $^{40}\text{K}$ , o  $^{214}\text{Bi}$  (eU) e o  $^{208}\text{Tl}$  (eTh), respectivamente.

O prefixo e (=equivalente), que precede os símbolos do urânio e tório, indica que o fluxo de raios gama medido pelos sistemas de detecção, não é originado desses elementos, mas dos radioelementos filhos de suas séries de decaimento, o  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$  (Duval, 1980; Pitkin e Duval, 1980 e Grasty et al., 1985), supondo-se o sistema em equilíbrio radioativo.

**TABELA 3.5 - JANELAS ESPECTRAIS USADAS PARA MEDIR A ENERGIA DOS RAIOS GAMA**

<b>Elemento Analisado</b>	<b>Isótopo Usado</b>	<b>Picos de Energia (MeV)</b>	<b>Janelas de Energia (MeV)</b>
Potássio	$^{40}\text{K}$	1,46	1,37 - 1,57
Urânio	$^{214}\text{Bi}$	1,76	1,66 - 1,86
Tório	$^{208}\text{Tl}$	2,62	2,41 - 2,81
Contagem Total			0,41 - 2,81

FONTE: Grasty et al. (1985), p.2612.

Os elementos  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$  são os escolhidos para definir as janelas de energia do urânio e tório, porque são os emissores com maiores energias dentro de cada série de decaimento e os que sofrem as menores influências possíveis pelo efeito Compton de outros emissores, sejam da mesma série ou de outras (Pascholati, 1990). A Figura 3.2 apresenta o espectro dos raios gama dos elementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ .

Geralmente, o sistema aéreo utilizado nos aerolevantamentos de raios gama, é composto por aeronaves, equipamentos auxiliares e sistemas de registro dos raios gama (IAEA, 1979).

As aeronaves, aviões ou helicópteros, são utilizadas de acordo com o custo operacional e as características do levantamento. Normalmente, os aviões mais leves são usados durante as fases de reconhecimento (investigações regionais), enquanto que, os helicópteros são utilizados para estudos de detalhe.

Os equipamentos auxiliares compreendem: radar altímetro, sistema Doppler, câmaras fotográficas aéreas ou sistemas de vídeo. Tais aparelhos têm as seguintes funções, respectivamente: o monitoramento contínuo da altitude de vôo, controle de posicionamento da aeronave e registro dos pontos amostrados ao longo das faixas de vôo.

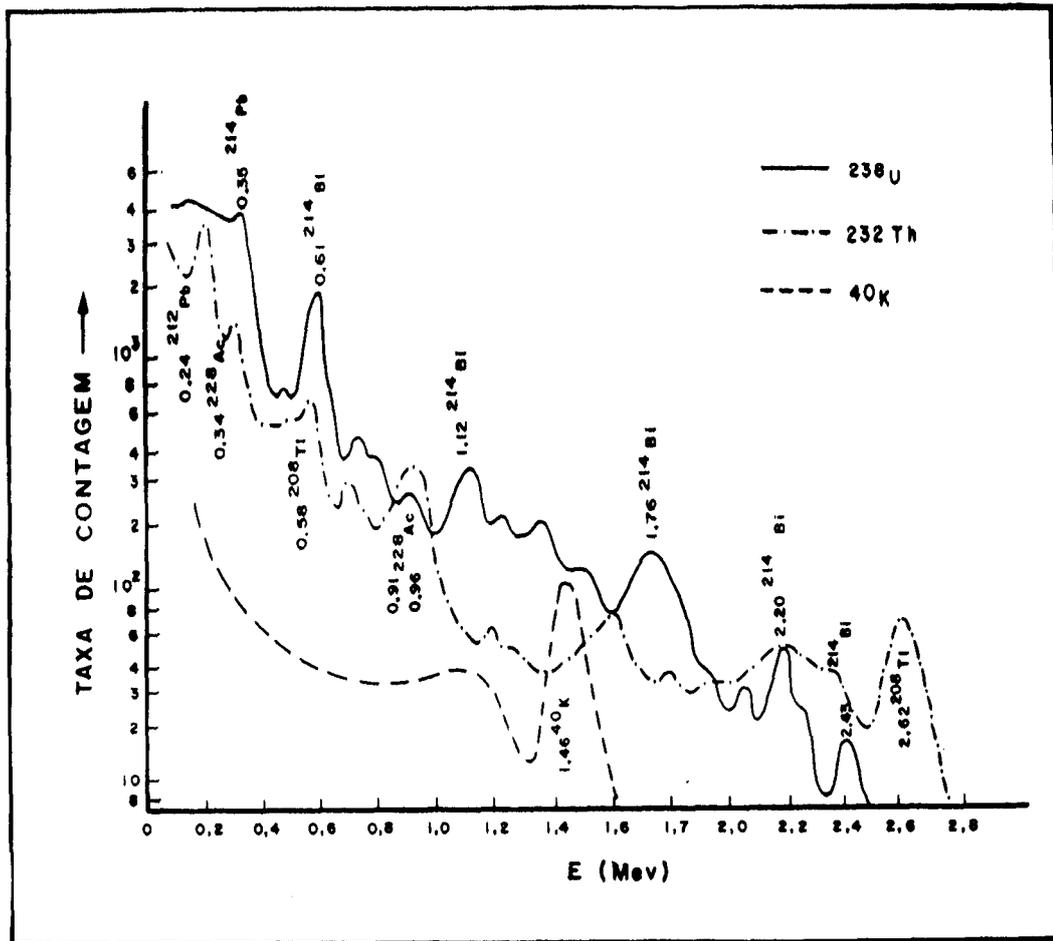


Fig. 3.2 - Espectros de energia das emissões gama dos radioelementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ .

FONTE: Matolín (1984), p.201

Normalmente, as aeronaves são equipadas com câmaras fotográficas aéreas operando nos modos quadro e faixa contínua. Contudo, devido ao menor custo operacional, em alguns aerolevantamentos utiliza-se o sistema Doppler para localização dos pontos amostrados. Esse sistema tem como desvantagem, localizações não muito precisas. Hoje, utiliza-se com frequência para a localização dos pontos amostrados o *Global Positioning System* (GPS) que oferece boa precisão.

Os sistemas de registro dos raios gama, durante os aerolevantamentos, são os **espectrômetros aéreos**. Os espectrômetros são divididos de acordo com as características do sistema analisador de pulsos elétricos em: **integrals** e **diferenciais**. Os espectrômetros integrals registram somente pulsos elétricos oriundos dos detectores com amplitude superior a um determinado nível de discriminação, enquanto os diferenciais registram os pulsos, cujas amplitudes caem dentro de um intervalo de energia, que é de-

nominado de canal ou janela de energia (Matolín, 1984).

Os espectrômetros aéreos, em geral, consistem de: um detector (contador de cintilação), um estabilizador de ganho (amplificador), um analisador de pulsos, um intervalômetro, um integrador de pulsos elétricos e registradores gráfico analógico e/ou digital.

O princípio de funcionamento dos espectrômetros pode ser ilustrado de acordo com a Figura 3.3.

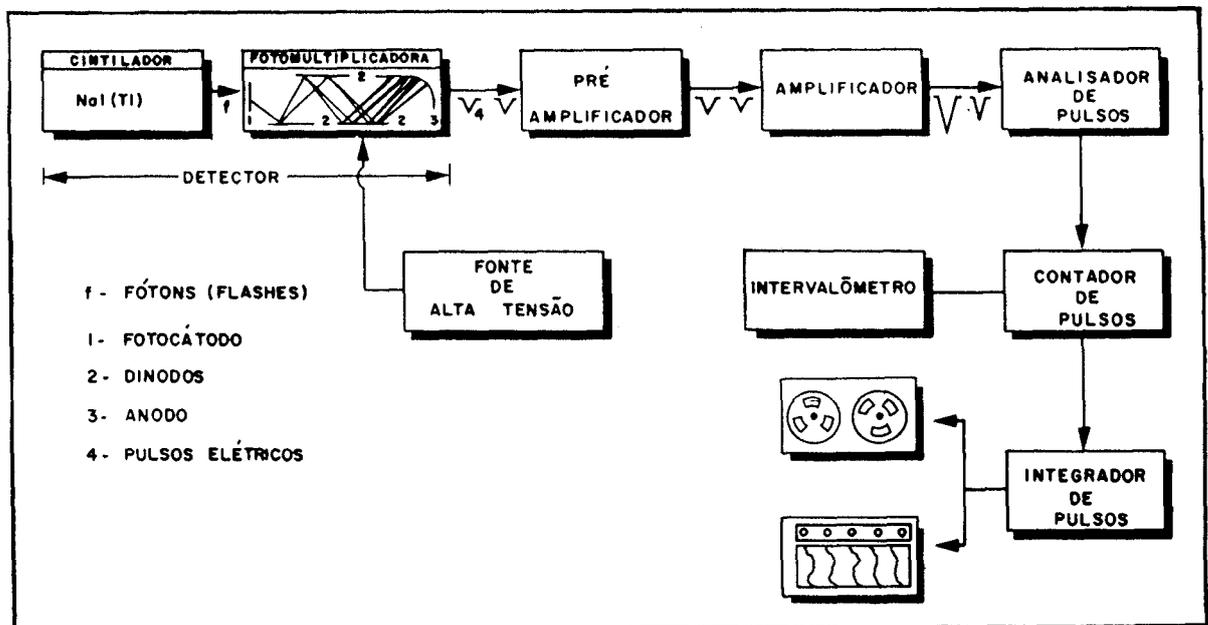


Fig. 3.3 - Representação esquemática de um espectrômetro aéreo.

FONTE: Adaptada de Schuch e Nordemann (1991), p.57; Matolín (1984), p.168 e p.171.

Conforme a Figura 3.3, a radiação gama incidente no espectrômetro é convertida em taxa de contagem obedecendo a seguinte sequência:

- a radiação gama incide sobre o material absorvedor [cintilador - NaI(Tl)], que responde: 1) absorvendo a energia dos fótons gama e, 2) produzindo *flashes* de luz (cintilações), que alcançam o fotocátodo do tubo fotomultiplicador;

- no tubo fotomultiplicador, o fotocatodo induz a ejeção de elétrons, cujo número vai se multiplicando progressivamente, como resultado da emissão secundária sobre os eletrodos auxiliares (dinodos), até que a nuvem de elétrons seja coletada pelo anodo;
- na saída do detector são obtidos os pulsos elétricos, que têm amplitude diretamente proporcional a energia da radiação detectada;
- os pulsos elétricos gerados são amplificados para que possam ser discriminados por um analisador de pulsos multicanal, que está diretamente ligado a um integrador de pulsos e um intervalômetro;
- por fim, na saída do integrador de pulsos está o registrador gráfico ou digital do espectro de energia da radiação gama detectada.

Para a determinação das concentrações terrestres (% , ppm) dos radioelementos, os espectrômetros aéreos devem ser calibrados.

A **calibração** dos espectrômetros aéreos envolvem: a determinação das razões de contagem entre canais, a sensibilidade do detector e os rendimentos de detecção (cps/ppm ou %).

A calibração dos aparelhos é feita sempre à mesma altitude de vôo do aerolevante, utilizando-se de fontes de calibração de concreto ou fontes planares (*pads*) e faixas testes, todas com concentrações conhecidas dos três radioelementos.

### 3.3.1 - FATORES QUE INFLUENCIAM AS MEDIDAS

Idealmente, em qualquer aerolevante gamaespectrométrico, as intensidades da radiação gama, que alcançariam cada janela de energia dos espectrômetros aéreos, deveriam ser proporcionais às concentrações de potássio, urânio e tório da superfície situada imediatamente abaixo da aeronave. Contudo, há uma série de fatores que modificam essa relação (Bristow, 1983).

Conforme Pitkin e Duval (1980) e Bristow (1983), os fatores que afetam o fluxo de radiação gama recebido pelos espectrômetros aéreos são: a **absorção atmosférica**, a **radiação de fundo atmosférico**, o **Efeito Compton** e a **cobertura vegetal**.

Devido à **absorção atmosférica**, os levantamentos aéreos de raios gama, geralmente, não excedem os 300 m de altitude. Os sinais de energia dos raios gama detectados, acima de 50 m da superfície são atenuados pela atmosfera segundo uma função exponencial, que é dada pela fórmula:

$$I = I_0 \exp(-\mu H) \quad (3.7)$$

onde: **I** é o valor da intensidade na altura **H**,  
**I<sub>0</sub>** é a intensidade da radiação ao nível do solo,  
**μ** é o coeficiente linear de absorção atmosférica.

Esse coeficiente de atenuação atmosférico ( $\mu$ ) varia com a energia dos raios gama e a densidade do ar. Maiores detalhes sobre essa redução de modo exponencial da energia gama natural com o aumento da quantidade de material absorvedor entre a fonte e o detector, pode ser encontrado em Dickson et al. (1981); Grasty et al. (1985) e Bailey (1986).

De acordo com Bristow (1983) e Minty (1992) as principais fontes da **radiação de fundo atmosférico**, em qualquer levantamento aerogamaespectrométrico, são: 1) o gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) e seus produtos filhos  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ ; 2) a radiação cósmica e 3) a radioatividade da aeronave e seus constituintes.

O  $^{222}\text{Rn}$  é um gás muito móvel que pode escapar das rochas e solos com fissuras para a atmosfera, em resposta as ações de mudanças de temperatura e pressão. Seus produtos filhos ( $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Pb}$ ), que junto aos aerossóis e partículas de poeira têm distribuição em função dos movimentos do ar e padrões dos ventos, são os maiores contribuidores da radiação de fundo atmosférico.

As radiações cósmicas primárias do exterior do nosso sistema solar e do sol, reagem com os núcleos dos átomos e moléculas na atmosfera superior gerando uma radiação secundária complexa. Essa radiação interage com o ar, aeronave e detector

e produz os raios gama *cósmicos* de fundo, que são medidos pelos detectores. Na baixa atmosfera, essa radiação tem uma distribuição de energia constante, que decresce em amplitude com a diminuição da altitude.

A radioatividade resultante da aeronave e seus constituintes, é constante e refere-se a contaminação de sua estrutura e equipamentos, bem como do detetor.

O **Efeito Compton** corresponde a contribuições de energias maiores para menores entre canais ou janelas de energia. As contribuições mais expressivas ocorrem devido às influências dos raios gama de mais alta energia nas janelas espectrais que cobrem as porções de baixa energia do espectro (Bristow, 1983).

Kogan et al. (1971) estudando o **efeito da cobertura vegetal** (florestas temperadas do Hemisfério Norte) na radiação gama, mostraram que a vegetação (biomassa) afeta o fluxo de radiação de duas maneiras principais: absorção e espalhamento. Eles, também, observaram que se as concentrações dos radioelementos no solo são relativamente altas, a vegetação pode ser um contribuidor de radiação gama.

Pereira e Nordemann (1983), também, estudaram o comportamento da radiação gama, calculando teoricamente a atenuação e a produção de fótons gama em um modelo de ambiente de floresta tropical. De acordo com os parâmetros selecionados para a descrição do modelo, eles observaram que a uma altura de vôo de 100m, uma cobertura vegetal de 35m pode atenuar de 40 a 60% da radiação gama original, dependendo da energia considerada. Além disso, à mesma altura de vôo, eles observaram que a energia do  $^{40}\text{K}$  (pico em 1,46 MeV) foi dominada pela fração de radiação gerada pela cobertura vegetal. Esse efeito, produção de fótons pela biomassa, é totalmente desprezível nos picos de energia do  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$ .

As razões que explicam essas duas últimas observações são:

- 1) as altas taxas de concentração de  $^{40}\text{K}$  na biomassa da floresta, associada à sua absorção do solo pelos sistemas de raízes das plantas (ciclo bioquímico) e acúmulo em troncos e folhas das árvores e;

2) as baixas concentrações de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , devido às suas propriedades químicas. Como regra geral, a concentração desses radioisótopos na biomassa corresponde às suas concentrações no solo. Contudo, em ambientes de floresta tropical, pequenas concentrações de urânio e tório podem ser reduzidas ainda mais, devido a alta taxa de transpiração através das folhas. Neste processo, os elementos filhos gasosos das séries de decaimento do urânio e tório são perdidos para a atmosfera, resultando em uma biomassa mais empobrecida em  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$ .

Desta forma, cabe ressaltar que tais observações tornam o  $^{40}\text{K}$ , o mais importante dos três radioelementos em relação a espectrometria aérea de raios gama, em ambientes de florestas tropicais, porque sua elevada concentração na biomassa, pode gerar anomalias falsas. Assim, deve-se ficar atento a este fato, contudo nesta pesquisa não foi utilizado o canal do K porque tal dado não estava disponível.

Na obtenção dos dados aerogamespectrométricos, as relações entre a radioatividade das rochas e/ou solos sobrevoadas e os sinais recebidos pelos espectrômetros à bordo das aeronaves dependem, também, dos seguintes fatores: volume de detector, espaçamento entre as linhas de vôo da aeronave, velocidade e altitude da aeronave, intervalo de tempo de amostragem, sensibilidade do detector e resolução espacial (Bristow, 1983 e Matolín, 1984). Estes últimos fatores estão relacionados com as características do aerolevanteamento, a configuração e performance dos espectrômetros.

Os parâmetros acima deveriam ser escolhidos de maneira criteriosa, para que os resultados obtidos sejam precisos. A precisão dos resultados desejados, em um levantamento aéreo de raios gama, dita por consequência o volume de cristais de NaI(Tl) que deve ser usado. Geralmente, os sistemas de registro dos raios gama são equipados com volumes de NaI(Tl) entre 5000 e 50000 cm<sup>3</sup> (IAEA, 1979). Quando se usa pequenos volumes de NaI(Tl), aumentam-se os erros de medição. Esses erros podem ser reduzidos, através da acumulação das taxas de contagem, ou seja, aumentando-se os intervalos de tempo de amostragem (Pitkin e Duval, 1980).

Geralmente, o tamanho dos alvos controla os parâmetros de altitude e espaçamento entre as linhas de vôo. Genericamente, o espaçamento superior a 3 km é adequado para mapeamentos geológicos e anomalias regionais, enquanto que o inferior a 3 km é utilizado para detectar anomalias localizadas e prover um mapeamento geoló-

gico de detalhe (Pitkin e Duval, 1980).

A detectabilidade dos alvos e a resolução espacial decrescem com o aumento da altitude de vôo, porque ocorre um aumento no campo de visada do espectrômetro aéreo. Ilustrando a influência desses fatores na detectabilidade dos alvos, as Figuras 3.4 e 3.5 mostram as relações entre a altitude de vôo e a resolução espacial, bem como a relação entre o espaçamento das linhas de vôo e a porcentagem cobertura no terreno para diferentes altitudes do detector.

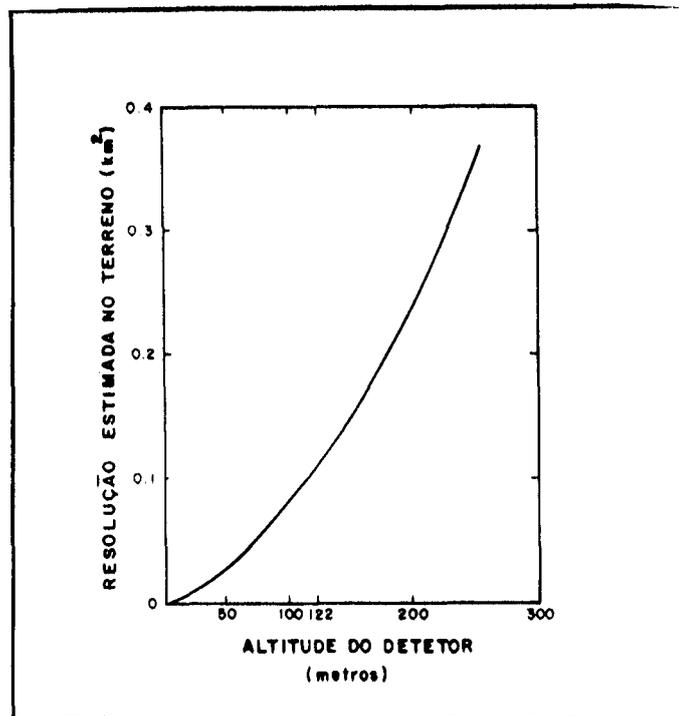


Fig. 3.4 - Resolução espacial estimada em função da altitude do detetor.

FONTE: Pitkin e Duval (1980), p.1434.

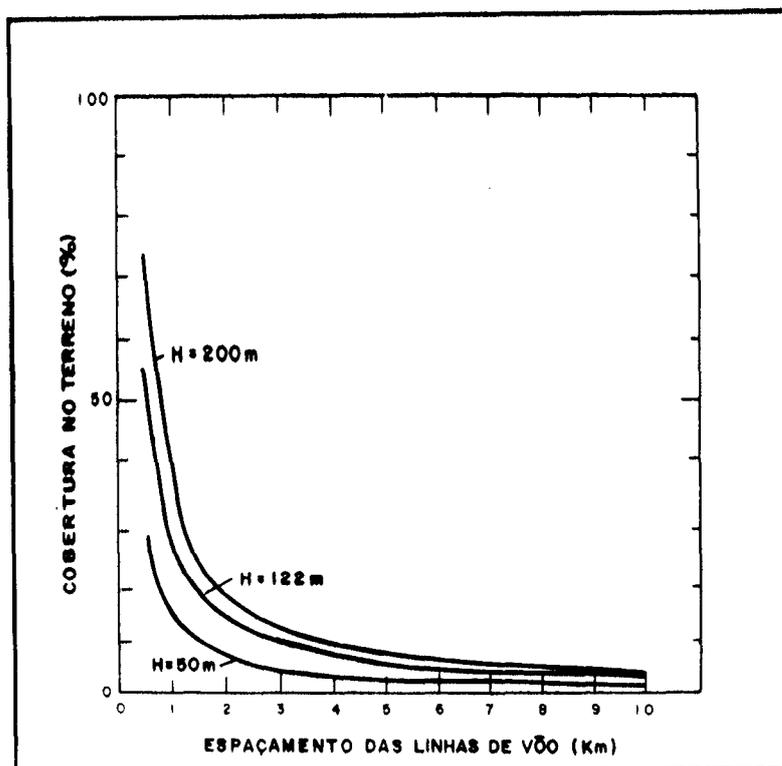


Fig. 3.5 - Porcentagens de cobertura do terreno em função do espaçamento das linhas de voo para altitudes fixas (H).

FONTE: Pitkin e Duval (1980), p.1434.

### 3.3.2 - CORREÇÕES GAMAESPECTROMÉTRICAS

As principais correções aplicadas aos dados espectrométricos aéreos incluem: a **subtração da radiação de fundo atmosférico (*background*)**, o **Efeito Compton** e a **correção de altitude**.

A **radiação de fundo atmosférico**, devido ao  $^{222}\text{Rn}$  e seus produtos filhos ( $^{214}\text{Bi}$  e o  $^{214}\text{Pb}$ ), a radiação cósmica e, a radioatividade da aeronave e seus constituintes deve ser subtraída dos dados radiométricos.

Destas fontes de radiação, a concentração e a distribuição do  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Pb}$ , fortemente influenciadas pelas condições atmosféricas são as mais difíceis de serem determinadas (IAEA, 1979; Minty, 1992). Devido às variações de concentração e distribuição do  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{214}\text{Pb}$ , de acordo com o tempo e o lugar, em muitos casos é necessário monitorar a radioatividade atmosférica ao longo de cada linha de voo, através de detectores protegidos da radiação terrestre (IAEA, 1979).

Na maioria dos levantamentos aerogamaespectrométricos, para correção das taxas de contagem ao longo de cada linha de vôo, são tomados os valores médios das taxas de contagem da radiação de fundo atmosférico determinadas no início e término das operações diárias. Existem diversas maneiras de determinação da radiação de fundo atmosférico, mas os melhores métodos são (Pitkin e Duval, 1980 e Minty, 1992):

- o registro do nível de radiação tomado diariamente, sobrevoando-se grandes corpos d'água à mesma altitude do levantamento;
- a medição da radiação de fundo em uma altitude superior a 600m da superfície.

O **Efeito Compton** é eliminado dos dados radiométricos, após a determinação dos coeficientes de interação entre canais ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ), assumindo-se as seguintes relações (Grasty, 1975):

$$Th_c = Th_{bg} + aU_c \quad (3.8)$$

$$U_c = U_{bg} - \alpha Th_{bg} \quad (3.9)$$

$$K_c = K_{bg} - \beta Th_{bg} - \gamma U_c \quad (3.10)$$

onde:  $a$  equivale ao coeficiente de interação entre o canal de  $U$  e  $Th$  durante a medição;  
 $K_c$ ,  $Th_c$  e  $U_c$  correspondem as taxas de contagem corrigidas do Efeito Compton;  
 $K_{bg}$ ,  $Th_{bg}$  e  $U_{bg}$  correspondem as taxas de contagem corrigidas do *background*.

Como uma aeronave voando a baixa altitude não consegue manter perfeitamente constante a sua altura de vôo sobre o terreno, devido às mudanças de relevo, variações não desejadas nas taxas de contagem são, conseqüentemente, muito comuns (IAEA, 1979). Essas variações das taxas de contagem resultam, principalmente devido a atenuação dos raios gama pela atmosfera.

Para proceder a **correção de altitude** das taxas de contagem de cada linha de vôo, a distância entre a superfície do terreno e a aeronave deve ser monitorada pelos radares altímetros. Esse monitoramento permite calcular o fator de correção de altitude ( $F$ ), que deverá multiplicar cada taxa de contagem obtida durante o levanta-

mento (IAEA, 1979). Se  $H$  e  $H_0$  correspondem as alturas de vôo atual e planejada, respectivamente,  $F$  é dado por:

$$F = \exp[\mu (H_0 - H)] \quad (3.11)$$

onde:  $\mu$  é o coeficiente linear da absorção atmosférica.

Para determinar o coeficiente de atenuação atmosférico ( $\mu$ ) de cada canal, utiliza-se a equação (3.7), realizando-se medições ao nível do solo e em diversas altitudes, de preferência sobre regiões planas.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E METODOLOGIA

#### 4.1 - MATERIAIS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados como principais fontes de informação:

- os dados aerogamaespectrométricos do Projeto Geofísico Brasil-Canadá (PGBC);
- as imagens digitais multiespectrais do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite LANDSAT 5 e
- mapas temáticos e descrições petrográficas.

##### 4.1.1 - AEROGAMAESPECTROMETRIA

Os dados aerogamaespectrométricos desta pesquisa (canais eU, eTh e CT), coletados, corrigidos e processados pela Northway Survey Corporation Limited (NSCL), referem-se à Fase II do Projeto Geofísico Brasil Canadá (PGBC), realizado entre jun/out de 1975 e maio/agos de 1976. Foram levantados na área de estudo, cerca de 3.283 km de perfis, com um total de aproximadamente 53.820 registros.

Esse levantamento aerogamaespectrométrico, associado ao aeromagnético, foi executado com seguintes especificações:

- espaçamento de 1km entre as linhas de vôo (perfis), posicionadas segundo à direção N-S (controle E-W);
- altura média de vôo sobre o terreno de 150 m e;
- intervalo de amostragem ao longo de cada perfil, de um segundo, correspondendo a uma distância média no terreno de 61 m.

Nesse aerolevanteamento geofísico utilizaram-se: 1) duas aeronaves do tipo Douglas (DC3), com prefixos CFFBS e CFIMA; 2) dois espectrômetros aéreos diferenciais de quatro canais (SCINTREX GAD-5), operando com dois detectores (SCINTREX GSA-77 e HARSHAW) e um tempo de integração de um segundo; 3) volume total aproximado de 25.000cm<sup>3</sup> de cristais de NaI(Tl) arranjados em dois *containers* com temperatura estabilizada; 4) gravadores gráficos e digitais e 5) radares altímetros (Honeywell HG9050), sistema de navegação Doppler (Bendix DRA12) e câmaras fotográficas aéreas (CARL Mark VII - 35 mm e AS 35 mm), operando nos modos quadro e faixa contínua, respectivamente.

As principais operações de processamento dos dados executadas pela NSCL foram: 1) verificação, edição e cópia dos dados digitais; 2) digitalização dos perfis geofísicos e conversão para o sistema de coordenadas UTM; 3) correções gamaespectrométricas; 4) conversão das taxas de contagem dos radioelementos urânio e tório para concentrações superficiais (ppm) e 5) geração de grades regulares e mapas de contornos.

#### 4.1.1.1 - CORREÇÕES GAMAESPECTROMÉTRICAS

Para melhorar a qualidade estatística das medições gamaespectrométricas, obteve-se a média das taxas de contagem por segundo de cada canal, considerando um intervalo de cinco pontos amostrados. De acordo com IAEA (1979), os resultados obtidos, adotando-se este procedimento, equivalem a uma medição espectrométrica com um período de integração de cinco segundos diminuindo, portanto, a resolução espacial dos dados.

As correções gamaespectrométricas empregadas aos dados radiométricos (NSCL, 1979), correspondem: a **redução da radiação de fundo atmosférico**, a **correção do Efeito Compton** e a **correção de altitude**.

Para processar a **correção da radiação de fundo atmosférico**, foram realizados, no início e no final das operações diárias do aerolevanteamento, duas medições da radiação de fundo para cada canal individualmente, a uma altura de vôo sobre o terreno de 1000 m.

Foram calculados os valores médio das taxas de contagem da radiação de fundo atmosférico (cps), registradas individualmente nos canais do U, Th e CT, para então utilizá-las na redução dos dados.

Desta forma, a correção da radiação de fundo atmosférica foi processada conforme as equações abaixo:

$$Th_b = Th_a - Th_{bg} \quad (4.1)$$

$$U_b = U_a - U_{bg} \quad (4.2)$$

$$CT_b = CT_a - CT_{bg} \quad (4.3)$$

onde:  $U_b$ ,  $Th_b$  e  $CT_b$  são as taxas de contagem de cada canal corrigidas;

$U_a$ ,  $Th_a$  e  $CT_a$  são as taxas de contagem de cada registro ao longo das linhas de vôo e;

$U_{bg}$ ,  $Th_{bg}$  e  $CT_{bg}$  são os valores médios da radiação de fundo atmosférico (*background*) registrado em cada canal.

A **correção do Efeito Compton** foi efetuada, após a redução da radiação de fundo atmosférico de cada canal. Foram utilizados para realização das correções, os coeficientes ( $\alpha$ , a) de interação entre canais obtidos durante a calibração dos espectrômetros aéreos (Tabela 4.1). A calibração dos espectrômetros aéreos foi realizada no Serviço Geológico do Canadá (GSC) sobre as *pads* e faixa teste de Breckenridge, próximo a Ottawa.

**TABELA 4.1 - COEFICIENTES DE INTERAÇÃO ENTRE CANAIS USADOS PARA CORREÇÃO DO EFEITO COMPTON**

Coeficientes	CFFBS 1975	CFFBS 1976	CFIMA 1975	CFIMA 1976
(Th U)	0,34	0,425	0,46	0,379
a (U Th)	0,05	0,05	0,05	0,05

CFFBS e CFIMA - prefixos das aeronaves Douglas (DC3) referindo-se aos seus respectivos espectrômetros aéreos.

Extraída de NSCL (1979), p.48.

Como existe uma maior dependência do coeficiente com a variação de altitude aplicou-se inicialmente uma correção de acordo com a seguinte equação:

$$\alpha_H = \alpha + 0,02 + 0,0025 H_0 \quad (4.5)$$

onde:  $H_0$  é dado por  $H_0 = H_T (273)/(T + 273)$ ;  
 $\alpha$  é o coeficiente Compton medido na calibração;  
 $\alpha_H$  é o valor corrigido em relação à altitude.

Assumindo as interrelações Compton apresentadas na secção 3.3.2, foram empregadas as seguintes correções abaixo:

$$Th_c = (Th_u - aU_u)/(1 - \alpha a) \quad (4.6)$$

$$U_c = (U_u - \alpha Th_u)/(1 - \alpha a) \quad (4.7)$$

onde:  $U_c$  e  $Th_c$  denotam os valores corrigidos ;  
 $U_u$  e  $Th_u$  equivalem às medições sem correção do Efeito Compton  
 $a$  é o coeficiente de interferência do  $^{214}\text{Bi}$  em 2,43 MeV na janela de energia do Th.

Apesar desse aerolevante geofísico ter sido planejado para ser executado a uma altitude fixa de 150 m, em função do relevo e da vegetação, ocorreram variações de altitude da aeronave em relação à superfície do terreno.

Para correção dessa variação de altitude da aeronave, assumiu-se uma atenuação exponencial do sinal com a altitude. Desta forma, os dados radiométricos foram corrigidos aplicando-se as seguintes equações:

$$Th_{alt} = Th_c \cdot \exp(\mu H) \quad (4.9)$$

$$U_{alt} = U_c \cdot \exp(\mu H) \quad (4.10)$$

$$CT_{alt} = CT_c \cdot \exp(\mu H) \quad (4.11)$$

onde:  $U_{alt}$ ,  $Th_{alt}$  e  $CT_{alt}$  correspondem aos valores corrigidos em relação a altura  
 $U_c$ ,  $Th_c$  e  $CT_c$  equivalem aos valores corrigidos do efeito Compton,  
 $H = H_0 - H_p$ ;  
 $H_p$  é a altura planejada do levantamento;  
 $H_0$  é a altura, na qual foi efetuada a medição;  
 $\mu$  é o coeficiente de atenuação atmosférico.

#### 4.1.2 - IMAGENS TM/LANDSAT 5 (ÁREA DO POJUCA)

Foram utilizadas para realização do trabalho, as seis bandas **TM** (1, 2, 3, 4, 5 e 7) multiespectrais do satélite LANDSAT 5, pertencentes ao banco de dados digitais da **Área do Pojuca** (Paradella et al., 1990).

A cena de interesse refere-se a órbita/ponto **224/64**, quadrante **C** de **31/05/84**, com elevação solar de 46° e azimute de 50°. Esta passagem foi escolhida, a fim de se evitar os efeitos da ação antrópica ligados às atividades de mineração presentes na área teste.

Segundo Paradella et al. (1990), para correção geométrica das imagens **TM/Landsat** ao sistema de coordenadas (UTM), foram utilizados 50 pontos de controle selecionados nas Folhas Serra dos Carajás, Rio Cinzento e Caldeirão (1:100.000) e no mapa geológico elaborado por DOCEGEO (1984) na escala 1:20.000.

Devido a densa cobertura vegetal, a amostragem dos pontos de controle teve que ser concentrada ao longo das estradas dos projetos de mineração e nas confluências das drenagens principais da bacia do rio Itacaiúnas. Para maior segurança quanto à localização dos pontos de controle, as imagens foram realçadas por equalização de frequência e divisões de bandas, técnicas que foram fundamentais para enfatizar detalhes nas estradas e drenagens. Após, uma seleção rigorosa dos pontos de controle, as imagens **TM/Landsat** foram corrigidas geometricamente com a transformação de pequena ordem (Afim Geral) e interpolação: **vizinho mais próximo** e o **bilinear**. Foi utilizado para a integração com as imagens gama, as imagens **TM/Landsat** corrigidas geometricamente pelo interpolação vizinho mais próximo.

A correção atmosférica das imagens **TM/Landsat** foi efetuada utilizando-se o método da subtração do mínimo histograma (Chavez Jr., 1975). Esse método implica na determinação do valor digital mais baixo encontrado entre os *pixels* de uma imagem e, na subtração direta desse valor determinado para todos os *pixels* restantes da imagem.

#### 4.1.3 - MAPAS TEMÁTICOS E DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS

Os mapas temáticos utilizados referem-se aos mapas geológicos e de classes geobotânicas. Os mapas geológicos foram elaborados pela: 1) DOCEGEO (1984 e 1988), nas escalas de 1:20.000 e 1:10.000; 2) Universidade Federal do Pará (Macambira et al., 1990) na escala 1:40.000 e 3) CPRM (1991) na escala 1:250.000. Tais mapas foram utilizados para verificação das correspondências entre as respostas radiométricas (geofísicas) e as unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo. Como fonte de informação geobotânica foi usado o mapa elaborado por Paradella et al. (1994), na escala 1:78.000. Finalmente, como fonte de informação petrográfica, foram utilizadas 119 lâminas descritas pela UFPA (Macambira et al., 1990) e pela Unesp (Rolim, 1993).

#### 4.2 - METODOLOGIA

A Figura 4.1 sintetiza esquematicamente a seqüência de trabalho proposta para: 1) a geração e realce de imagens geofísicas, 2) a avaliação da potencialidade dessas imagens isoladas e combinadas entre si, buscando as suas correlações com as unidades geológicas da área de estudo; e, 3) a integração com dados TM/Landsat visando, além da correlação com as unidades litológicas, a identificação de padrões estruturais.

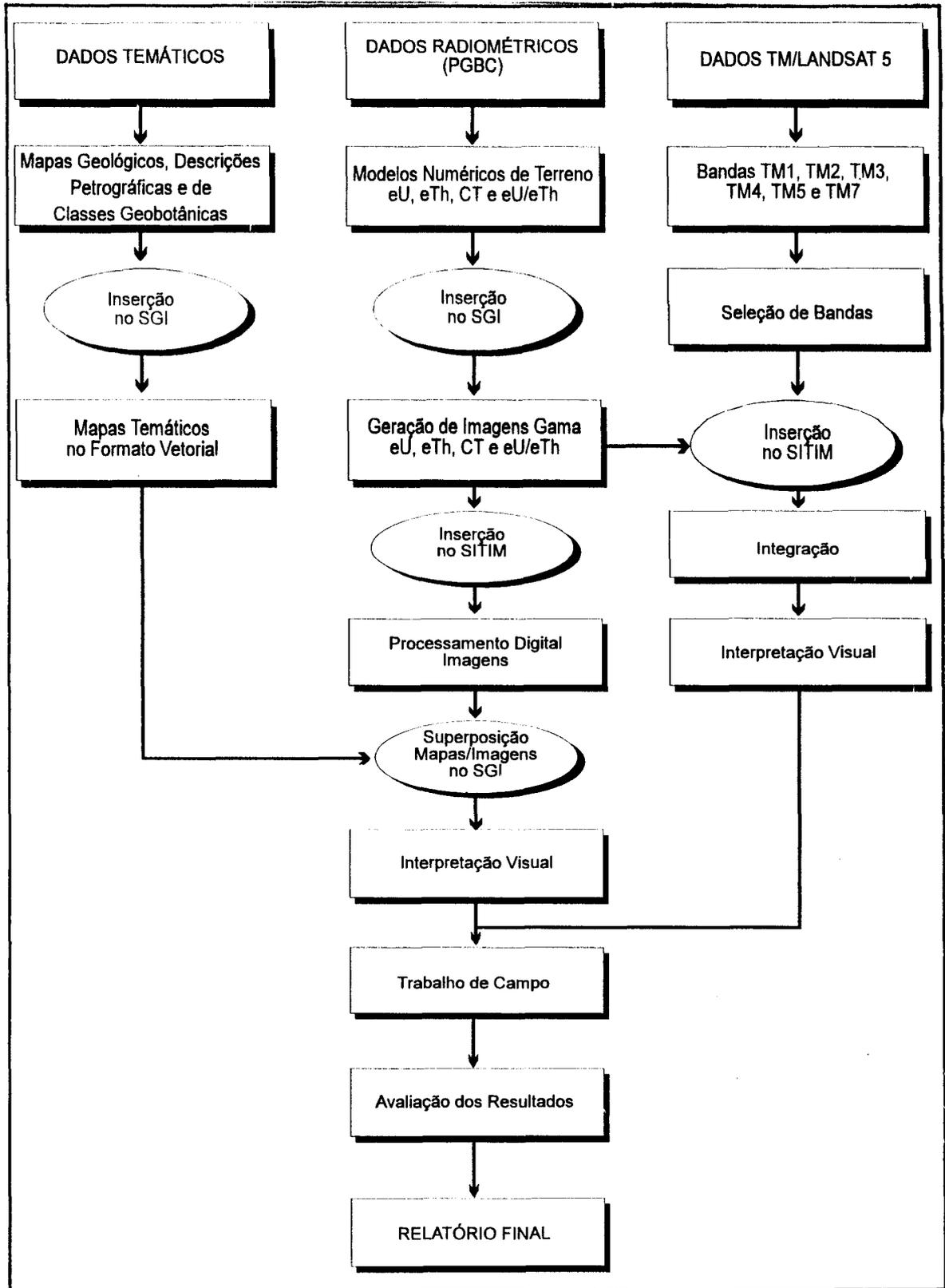


Fig. 4.1 - Seqüência de trabalho.

Em linhas gerais, esse trabalho, iniciou-se com a aquisição dos dados radiométricos (gamaespectrométricos), TM/Landsat e temáticos. Os dados geofísicos obtidos por um sistema de sensoriamento remoto não-imageador estavam na forma de modelos numéricos de terreno (MNTs). Esses MNTs foram inseridos no *software* SGI/INPE, sendo convertidos em imagens digitais. Posteriormente, essas imagens gama foram exportadas para o *software* SITIM/INPE, onde promoveu-se a aplicação de realces a essas imagens visando a extração das informações destes dados.

Os dados temáticos (mapas geológicos, de descrições petrográficas e de classes geobotânicas) foram inseridos no SGI/INPE, via mesa digitalizadora para combinação com as imagens gama. Os dados TM/Landsat 5 (bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7) já corrigidos geometricamente, foram submetidos ao processamento de imagem via SITIM/INPE, sendo posteriormente integrados via transformação IHS às imagens gama. Por fim, os melhores produtos obtidos durante o processamento digital das imagens foram interpretados visualmente, considerando como suporte a combinação dos mapas temáticos e imagens digitais para facilitar a verificação da correspondência entre as respostas radiométricas (geofísicas), as unidades estratigráficas e as classes geobotânicas. Estas fases foram importantes para direcionar o trabalho de campo para observações, que permitissem entender melhor os relacionamentos entre os planos de informação (imagens e mapas).

#### 4.2.1 - PROCESSAMENTO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

De acordo com Reeves (1985), geralmente, o processamento dos dados aerogeofísicos, inicia-se com produtos mais familiares, os mapas de contorno. Os mapas de contornos, são conexões de pontos com iguais valores, onde o intervalo de contorno é escolhido pelo operador. Ainda, segundo este autor, esses produtos não contêm a mesma qualidade de detalhes dos perfis geofísicos, mas provêm uma informação bidimensional essencial para o entendimento mais amplo da situação geológica. Assim, perfis e mapas de contornos são complementares.

Com o avanço tecnológico dos sistemas de informações geográficas (SIGs) e de sistemas de processamento digital de imagens, vem sendo utilizada a transformação dos dados geofísicos em imagens digitais, através da criação de modelos numéricos de terreno (MNTs). De acordo com Drury e Walker (1987), essa conversão

dos dados geofísicos para o formato imagem, facilita e torna mais agradável as suas interpretações visuais, devido a representação das propriedades monitoradas pelos métodos geofísicos, em níveis de cinza. Além disso, segundo estes autores, a acuidade visual humana é maximizada quando, para exibição dessas imagens, utilizam-se composições coloridas.

Segundo Duval (1983), embora o processo de geração de grades regulares, atue como filtro espacial sobre os dados geofísicos, reduzindo-lhes a resolução. A conversão dos dados radiométricos para o formato imagem, permite aos sistemas de análise de imagens, prover meios de exibição e manipulação de dados em duas dimensões. Além disso, tais meios facilitadas as correlações, combinações, integrações e interpretações visuais de dados distintos.

Existem numerosas técnicas (*krigage*, médias móveis, *Akima*, *spline* cúbica) para converter dados espalhados em grades regulares, mas a performance de cada uma depende da distribuição dos pontos e das características do método de interpolação. Conforme Schetselaar et al. (1990) e McDonald (1991), a natureza das séries de dados geofísicos, ou seja, suas características intrínsecas, devem ditar a técnica de interpolação e o tamanho da célula da grade para geração dos MNTs.

A escolha da técnica de interpolação e a dimensão da célula da grade são fatores críticos no processamento dos dados geofísicos, porque pode haver perda ou ganho na representação de detalhes, realce de ruídos e artefatos na criação dos MNTs. Atento a essas considerações compiladas de trabalhos anteriores para o processamento digital dos dados geofísicos (U, Th, CT e U/Th), foram estabelecidas duas metodologias: uma para reamostragem das grades regulares, referentes aos canais U, Th e CT e, outra para geração das imagens gamaespectrométricas.

#### 4.2.1.1 - GERAÇÃO DAS GRADES REGULARES (MNTs)

Os procedimentos de processamento dos dados aerogamaespectrométricos para geração das grades regulares, divide-se em duas fases distintas: 1) geração das grades regulares referentes aos canais U, Th e CT, com uma resolução de 625 x 625 m (NSCL, 1979) e 2) reamostragem das grades de 625 x 625 m para uma resolução de 125 x 125 m.

Na primeira fase, os dados originais (perfis geofísicos) foram convertidos em grades regulares pela NSCL, conforme as etapas apresentadas a seguir:

- a) análise das características intrínsecas dos dados originais (espaçamento entre as linhas de vôo, altura de vôo e correções gamaespectrométricas);
- b) definição da dimensão da célula da grade (625 x 625 m) e, conseqüentemente das frequências do filtro passa-banda (0.5 ciclos/km na direção N-S e, 0.5 ciclos/km na direção E-W);
- c) geração das grades regulares. Nesta etapa, foi utilizado o método bidirecional, baseado em dois procedimentos básicos. Em um primeiro passo, os pontos são interpolados segundo a direção N-S, ao longo das linhas de vôo originais, gerando-se valores para cada intervalo regular escolhido (625 m). No segundo passo, os pontos calculados anteriormente, são interpolados na direção E-W, gerando um valor para cada nó da grade. Obteve-se, então, três grades regulares, arquivos **xyz** (**x,y** são as coordenadas UTM e **z** as taxas de contagem de cada canal) equivalentes aos canais U, Th e CT.

Na segunda fase, etapa de reamostragem das grades regulares com resolução de 625 x 625 m para uma resolução de 125 x 125 m, todas as operações foram realizadas pelo Divisão de Geofísica da CPRM - Rio de Janeiro.

A escolha da dimensão da célula grade (125 x 125 m) e, da frequência de corte do filtro anti-interferência (0.004 ciclos/metro), foi definida de acordo com Vasconcelos et al. (1994), que demonstra uma relação de dependência entre a dimensão da célula e a frequência de corte do filtro.

Segundo Vasconcelos et al. (1994), a célula da grade é definida com uma dimensão equivalente a 1/4 ou 1/8 do espaçamento médio entre os perfis geofísicos, enquanto a frequência de corte do filtro anti-interferência, é definida pelo o inverso do dobro da dimensão da célula da grade.

Para esta reamostragem das grades geofísicas, foi utilizado o *software* **BIGRID** (Ferreira, 1990), desenvolvido pela Paterson e Grant Limited, implementado no ambiente *mainframe* da CPRM.

O *software* **BIGRID**, para operações de: 1) geração de grades regulares, a partir dos perfis geofísicos originais e 2) reamostragens de grades regulares, permite a utilização de três funções interpoladoras: linear, *spline* cúbica e Akima. Além dessas funções interpoladoras o *software* dispõe de operações de filtragem de dados, para eliminação de uma dada faixa de frequência. Das três opções de interpolação foi selecionada para a reamostragem das grades a *spline* cúbica, devido ao seu caráter mais suavizador, no que se refere aos contornos de anomalias.

Foram, então, obtidos inicialmente três arquivos grade **xyz** (**x,y** são as coordenadas UTM e **z** as taxas de contagem de cada canal) com resolução de 125 x 125 m, equivalentes aos canais U, Th e CT. Finalizando esta etapa, gerou-se a grade U/Th, através da operação de divisão entre grades, totalizando quatro grades regulares (U, Th, CT e U/Th).

#### 4.2.1.2 - GERAÇÃO DAS IMAGENS GAMA

Na geração das imagens digitais referentes às grades U, Th, CT e U/Th, utilizou-se o *software* Sistema de Informação Geográfica (**SGI/INPE** - versão 2.4).

O **SGI/INPE** é um banco de dados geográficos que permite adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espacialmente. A estrutura geral do **SGI** é composta por cinco subsistemas principais (Felgueiras e Câmara, 1993), assim descritos:

- **definição**: inicializações e montagem do ambiente de trabalho;
- **entrada**: inserção e edição de dados e seus atributos, no sistema, incluindo a transferência de dados do **SITIM** para o **SGI**;

- **conversão**: transformações de formatos (varredura para vetor, vetor para varredura, grade para vetor e grade para varredura) e transformações geométricas;
- **análise geográfica**: geração de informações geográficas derivadas, a partir de operações sobre o conteúdo da base de dados geocodificados;
- **saída**: geração de documentos cartográficos, projeções geométricas planares de dados 3-D, impressão de dados da base em monitor gráfico ou em arquivos nos formatos ASCII, DXF, SEQ e outros.

De acordo com a descrição funcional do **SGI/INPE**, cada trabalho deve ser organizado pelo usuário em projetos, que são compostos de diferentes planos de informação (**PIs**). Cada **PI**, portanto, corresponde às diferentes fontes de informação gráficas ou não gráficas (altimetria, hidrografia, índice sócio-econômico, etc) da área de estudo.

Desta forma, após a definição do ambiente de trabalho e, inserção e edição dos dados, operações como combinação e integração dos dados disponíveis em cada **PI** podem ser facilmente realizadas.

A Figura 4.2 apresenta a rotina operacional de trabalho dessa pesquisa, no ambiente do **SGI/INPE**, utilizada para a geração das imagens gama a partir de grades regulares retangulares, em três etapas.

Para a geração das imagens gama, conforme a estrutura do **SGI/INPE**, foi criado inicialmente um ambiente de trabalho, através da definição de um projeto e de quatro planos de informação (**PIs**), correspondentes aos canais U, Th e CT e, à razão U/Th (Fase I - **DEFINIÇÃO**). Nesta etapa, foi fornecido de acordo com a exigência do *software*, o sistema de projeção cartográfica UTM SAD-69, uma vez que os perfis geofísicos foram convertidos para tal sistema de coordenadas planas (NSCL, 1979).

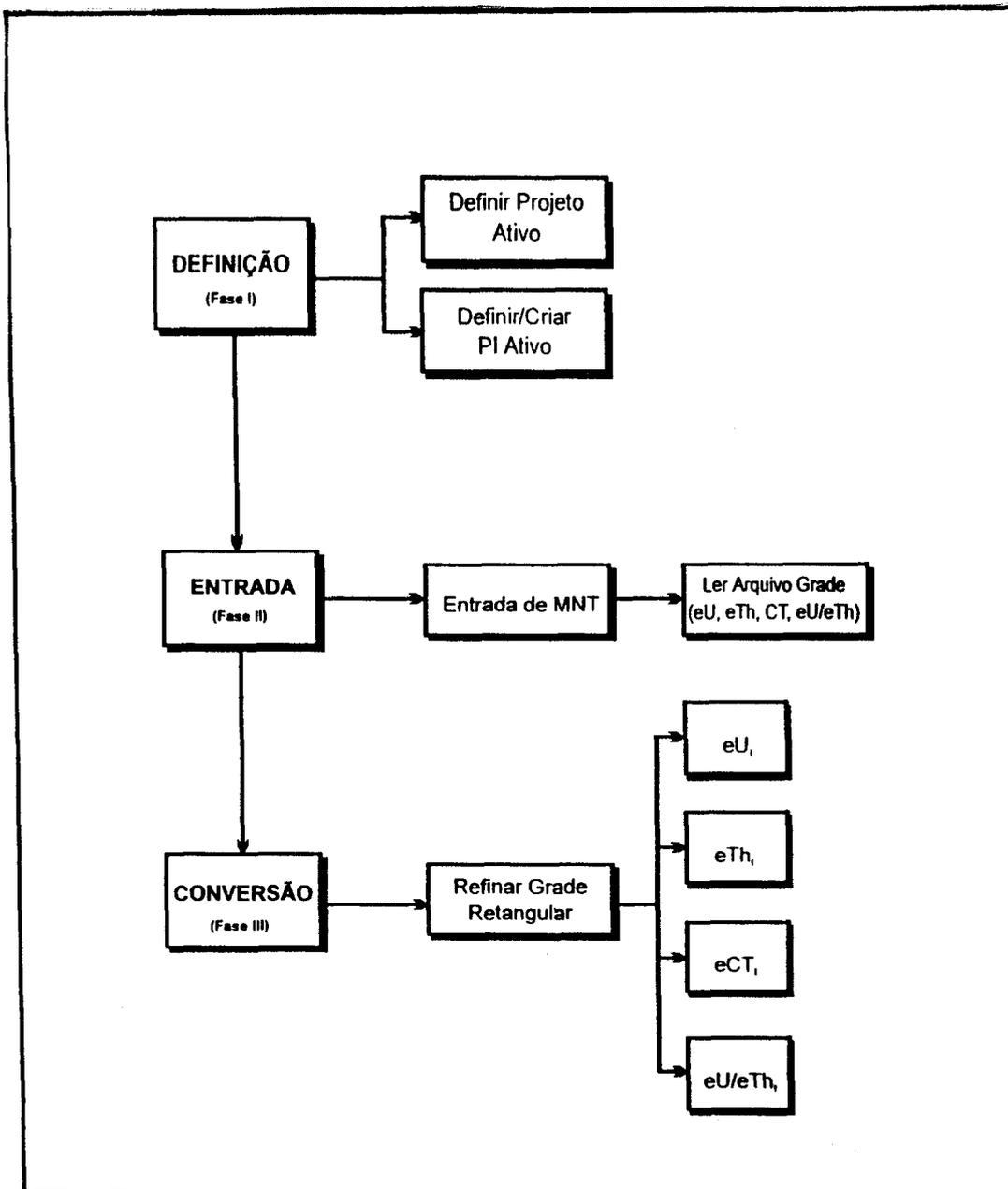


Fig. 4.2 - Sequência de operações no SGI/INPE para geração de imagens digitais, a partir de grades retangulares regulares.

Como os dados geofísicos já se encontravam na forma de grades regulares (MNTs - formato ASCII), promoveu-se a importação dos dados, através da função leitura de grade regular (Fase II - **ENTRADA**). Em seguida, na Fase III - **CONVERSÃO**, as grades regulares retangulares foram transformadas em arquivos imagem, utilizando-se a função refinamento de grade. Os arquivos imagem foram gerados com uma resolução de 30 x 30 m, visando a integração com dados TM/Landsat.

Na geração das imagens gama, os valores de cada nó das grades relativas aos canais U, Th, CT e, à razão U/Th, foram transformados em valores de níveis de cinza, dentro de um intervalo dinâmico de 0 a 255, que corresponde a capacidade de armazenamento de 8 bits. Esses valores quantizados, quando exibidos no formato imagem em um *display*, representam valores de brilho que variam do preto (nível 0) ao branco (nível 255).

O método de quantização que está implementado no SGI/INPE e, que foi utilizado para essa conversão dos valores da grade em níveis de cinza, corresponde a equalização linear. Esse método envolve a descoberta de valores mínimo e máximo de cada grade e, conseqüentemente, da distribuição de todos os valores da grade entre 0 e 255, através de uma divisão linear do intervalo.

#### 4.2.1.3 - PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS GAMA

Esta fase do trabalho envolveu o emprego de algumas técnicas de realce implementadas no SITIM/INPE, que são, comumente, empregadas no processamento digital das imagens de sensores remotos orbitais. Tais técnicas de realce compreendem: 1) ampliação linear de contraste (ALC), 2) composições coloridas (RGB), 3) transformação por componentes principais (TCP), 4) decorrelação e 5) transformação IHS. Tais técnicas acima foram empregadas às imagens gama, buscando-se: 1) obter bons produtos para análise visual, 2) realçar as imagens individualmente, combiná-las e integrá-las, no contexto da separabilidade de litologias e reconhecimento dos padrões estruturais da área de estudo.

Inicialmente, as imagens gama originais (preto e branco) tiveram seus histogramas analisados individualmente. Como as imagens apresentavam uma ampla distribuição dos *pixels*, ocupando quase todo o intervalo dinâmico de 0 a 255 (Figura 4.2), optou-se pela não aplicação do realce por ALC. O realce por ALC transforma os níveis de cinza de uma imagem original em novos valores (imagem realçada), dentro do intervalo dinâmico de 0 a 255, através de uma função linear.

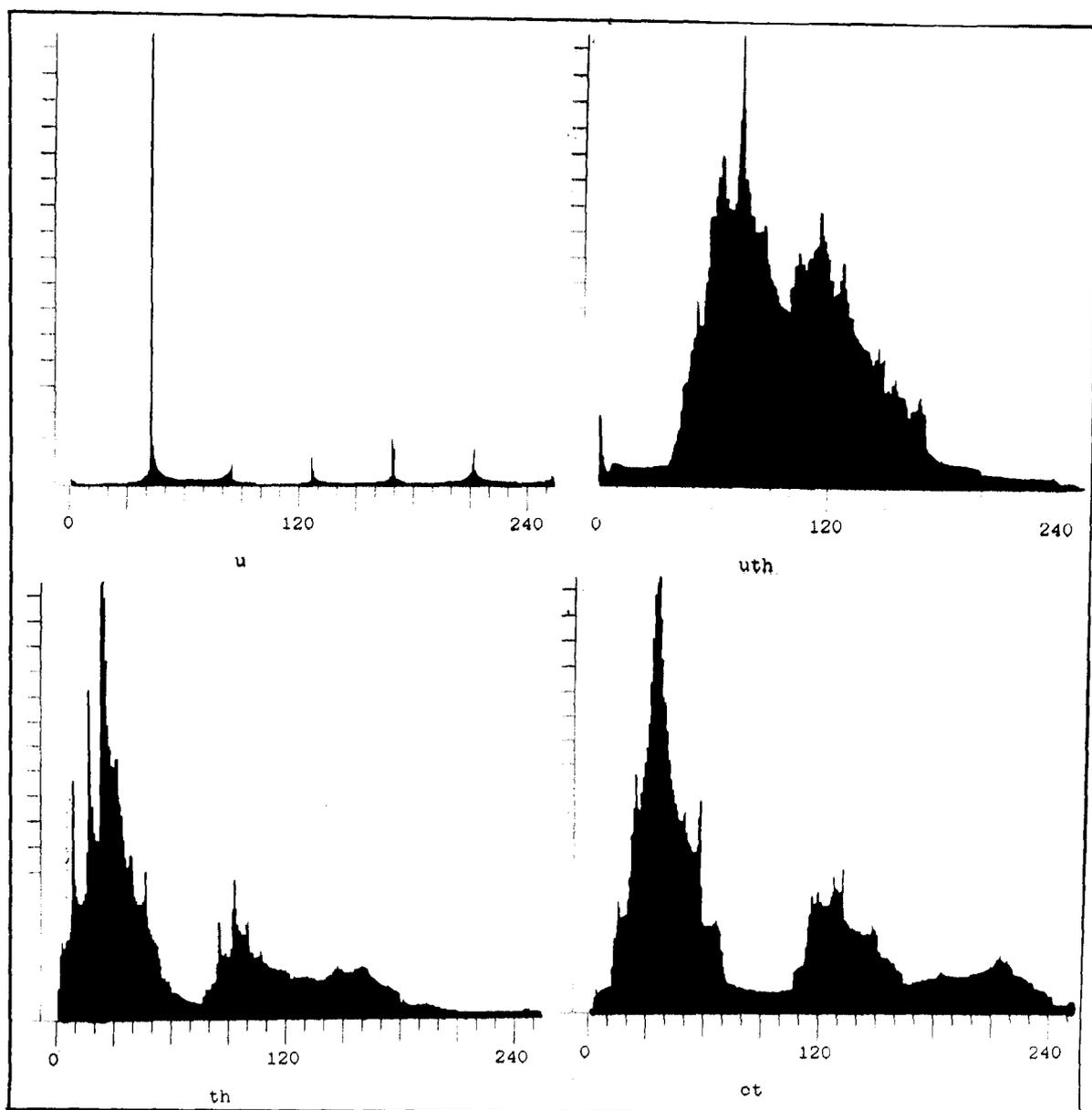


Fig. 4.3 - Histograma das imagens U, Th, CT e U/Th da Área do Pojuca.

Na seqüência, foram geradas composições coloridas das imagens gamaespectrométricas U, Th e CT sem realce por ALC. Nestas imagens, as concentrações dos radioelementos estão representadas, através das variações das matizes, que são obtidas através de um processo aditivo de combinação de cores, que associa a três imagens quaisquer monocromáticas, as cores primárias: vermelho (**R**), verde (**G**) e azul (**B**) (Dutra e Meneses, 1986; Meneses et al., 1991).

Cabe aqui abrir uma discussão sobre alguns trabalhos que utilizaram composições coloridas de imagens gama em mapeamentos geológicos.

Duval (1983) desenvolveu a técnica *overlay*, que combina três dos parâmetros eU, eTh, K, eU/eTh, eU/K e eTh/K, na forma de imagens coloridas. Essa composições coloridas refletem diferenças litológicas e áreas anômalas, onde a concentração relativa de um elemento específico é elevada. Segundo o autor, essa técnica pode ser usada para estudar áreas com alteração hidrotermal (imagem potássio) e na pesquisa de depósitos de minerais pesados e terras raras (imagem tório).

Broome (1990) observou, contudo, que as imagens coloridas geradas pelo método *overlay* (Duval, 1983), não realçam sútis taxas de variação dos radioelementos. Assim, ele estabeleceu a imagem radioelemento ternário que: 1) exibe as taxas de variação dos elementos por mudanças na matiz e, 2) usa a radioatividade total para controlar a saturação da cor. Esses dois fatores permitem que as informações de taxa e intensidade sejam exibidas em uma imagem individual. Além disso, tais fatores são importantes na discriminação de litologias, uma vez que as concentrações dos radioelementos são altamente correlacionadas.

Rejl, Saic e Dedacèk (1991) combinaram as imagens gama eU, eTh e %K, utilizando-se composições coloridas, técnica de realce comum no processamento de imagens de satélites. Eles, notaram que esse tipo de exibição é adequada para o mapeamento geológico, porque permitem expressar os conteúdos de potássio, equivalentes de urânio e tório associados a diferentes padrões de cores. Afirmam, também, que para aplicação em geologia, o melhor modo de exibição dessas imagens são os diagramas ternários (Broome, 1990).

A transformação por componentes principais (TCP) é uma técnica de realce que envolve uma rotação e uma translação num espaço hipotético de atributos espectrais, produzindo novas imagens denominadas de componentes ou eixos, que são combinações lineares das imagens originais. Tal transformação foi aplicada às imagens U, Th, CT e U/Th, visando a criação de novas imagens, que apresentassem informações não correlacionadas ou redundantes. No entanto, ficou-se atento ao fato de que, o realce por componentes principais é baseado no conteúdo total da imagem e não nas propriedades dos alvos individuais, por isso ele foi utilizado como uma ferramenta mais

para distinguir alvos do que para identificá-los (Paradella et al., 1990; Meneses et al., 1991).

O realce por decorrelação, processado apenas para um número máximo de três imagens, foi aplicado às imagens U, Th e CT. Esta técnica produz novas imagens, cujos *pixels* estão distribuídos em todo o espaço de cores, maximizando o número de possíveis feições de cores sem alterar as matizes das imagens originais. Os procedimentos de realce por decorrelação consistem: 1) numa transformação por componentes principais, seguido por equalização de variância e; 2) uma rotação que é inversa àquela usada na transformação por componentes principais (Meneses et al., 1991). Esse retorno dos novos eixos à posição original permite que as relações de cores básicas das imagens originais sejam preservadas. Isto é importante e facilita a interpretação da imagem realçada, porque o entendimento das cores de uma imagem gamaespectrométrica está diretamente relacionada com a concentração dos radioelementos.

Quando as composições coloridas RGB não apresentam bons realces tonais, devido a alta correlação ou redundância de informações entre as imagens, o sistema intensidade (I), matiz (H) e saturação (S) aparece como uma boa forma alternativa ao espaço RGB para representação das cores.

As cores, no espaço **IHS**, são definidas pelos seus três atributos intensidade, matiz e saturação. Neste espaço, a **intensidade (I)** representa a energia total associada a uma cor; a **matiz (H)** o comprimento de onda médio ou dominante (sensação de cor), enquanto que a **saturação (S)** está associada com a pureza da cor, ou seja, a porcentagem de branco presente na cor. Esses atributos descrevem a formação das cores de uma maneira muito próxima àquela percebida pelo sistema visual humano. Devido a esse fator e ao modo balanceado com que as informações contidas nas imagens são reproduzidas nos monitores coloridos, a transformação **IHS** é um método que apresenta nítidas vantagens em relação ao sistema **RGB** para reprodução de imagens coloridas (Dutra e Meneses, 1986; 1987).

Aplicou-se a transformação IHS as imagens U, Th e CT, sabendo-se que nesse espaço, é possível manipular cada componente separadamente, para se obter um maior controle sobre o processo de realce de cores (Dutra e Meneses, 1988). As-

sim, manipulou-se os parâmetros **I**, **H** e **S**, antes da transformação do sistema **IHS** para o **RGB**, envolvendo operações, tais como: 1) o realce por ALC do canal intensidade (**I**); 2) rotação da matiz (**H**) e; 3) reescalonamento da saturação (**S**). Desta forma, foram exploradas as principais possibilidades de manipulação dos componente **I**, **H** e **S**, esperando-se, assim, obter melhores produtos que as composições coloridas **RGB**.

#### 4.2.1.4 - INTEGRAÇÃO DE DADOS DE NATUREZAS DIFERENTES

A análise combinada de dados geológicos e geofísicos com dados de sensoriamento remoto orbital, através dos sistemas de análises de imagem e dos sistemas de informações geográficas (SIGs), é adequada para se obter mais informação que a contida em uma série de dados quaisquer (Crawford, 1981; Eliason et al., 1983; Aarnisalo et al., 1982; McInnis, 1986; Kowalik, 1987, Rolim, 1993). Segundo Harris (1991) existem muitas técnicas para a combinação de dados digitais, mas a maioria está concentrada em duas categorias: 1) **transformações estatísticas/aritméticas** e 2) **transformações visuais no *display***.

As **transformações estatísticas/aritméticas**, tais como: as componentes principais, a análise canônica, e as operações aritméticas, são técnicas efetivas para combinação de dados multivariados. Entretanto, os produtos finais dessas transformações (imagens em composições coloridas) são, frequentemente, difíceis para interpretação qualitativa, porque a integridade original do dado não é preservada. Isso é comum no caso de imagens coloridas de componentes principais, onde a imagem resultante é caracterizada, frequentemente, por cores vivas que, muitas vezes, são de difícil correlação com feições de superfície.

As **transformações a cores no *display***, tais como: composições coloridas **RGB** e transformação **IHS**, podem ser usadas para produzir apresentações mais efetivas para procedimentos de interpretação qualitativa e quantitativa.

Aarnisalo (1984), fez um estudo integrado, que envolveu o uso simultâneo de dados geofísicos (magnéticos, eletromagnéticos, gamaespectrométricos e gravimétricos), Landsat e topográficos. Esses dados foram integrados buscando a identificação de depósitos de Ni-Cu e Cu-Co-Zn, em terrenos situados no Escudo Báltico da

Finlândia, que se caracterizam pelas presenças de depósitos glaciais e densa cobertura vegetal.

Os dados geofísicos e topográficos foram transformados em imagens digitais, para posterior integração com imagens Landsat. Essas imagens foram combinadas usando três níveis diferentes de processamento e integração: 1) o **digital**, através do processamento de imagem (filtragens espaciais, divisões, realce de contraste e análise por componentes principais); o 2) **fotográfico**, preto e branco e composições coloridas e; 3) o **manual**, com transparências e *overlay*. Os produtos finais exibidos como imagens e mapas temáticos, revelaram feições litológicas e estruturais relevantes. A integração das imagens Landsat/topográfica exibiram melhor feições de deformação rúptil, falhamentos e fraturamentos de rochas. As imagens magnéticas e eletromagnéticas realçaram feições de deformação plástica e corpos máficos e ultramáficos, potenciais em mineralizações de Ni-Cu e Cu-Co-Zn. As imagens gamaespectrométricas contribuíram tanto na identificação de feições de deformação rúptil, quanto no mapeamento de rochas graníticas, ricas em potássio.

McInnis e Akhavi (1986) criaram uma base de dados digitais para a área de Guysborough County, sudeste de Nova Scotia (Canadá). Essa base de dados foi gerada, através da digitalização, reamostragem, sobreposição e registro dos dados radiométricos aéreos, TM/Landsat e geológicos. A construção dessa base de dados tinha por objetivos: 1) a análise dos multiplanos, buscando o entendimento das relações espaciais entre as séries de dados; 2) prover informação pertinente a diferenciação de corpos plutônicos e; 3) selecionar áreas de *emplacement* mineral.

Os resultados finais dessa investigação obtidos, através da superposição dos planos da base de dados geocodificados, foram: 1) diferenciação das rochas graníticas de suas adjacentes sedimentares, baseado em suas características espectrais e radiométricas; 2) identificação da possibilidade de ocorrência de um número de fases graníticas não mapeadas anteriormente, baseado nas variações de distribuição e coalescência dos radioelementos e; 3) seleção de áreas apropriadas ao *emplacement* mineral, a partir da localização dos elevados valores da razão  $eU/eTh$  e, intersecções dos lineamentos estruturais.

Shupe e Akhavi (1989) integraram imagens TM/Landsat, dados gamaespectrométricos (mapas de contorno) e topográficos dos terrenos, que se esten-

dem de Halifax a St. Margaret's Bay, parte sul de Nova Scotia (Canadá). Essa integração de dados visava reconhecer áreas para exploração mineral, em locais com densa cobertura vegetal, depósitos glaciais e limitados afloramentos.

As imagens **TM/Landsat**, corrigidas e corregistradas a uma base topográfica UTM, empregou-se: transformação por componentes principais, divisões, ampliação linear de contraste e filtragens espaciais direcionais. Os produtos finais obtidos do processamento de imagens foram integrados com os dados gamaespectrométricos e topográficos, via superposição de planos, utilizando-se um SIG. Os resultados finais dessa integração foram: 1) o mapeamento de lineamentos estruturais e da distribuição de possíveis afloramentos e; 2) a identificação de áreas favoráveis à exploração mineral selecionadas, a partir da localização das elevadas concentrações de eU e dos altos valores da razão eU/eTh, além da densidade e padrão de lineamentos estruturais.

Harris e Murray (1989); Harris et al. (1990); Harris (1991), em estudos realizados em Nova Scotia, Quebec e norte de Ontário (Canadá), integraram os seguintes dados: 1) imagens **SAR** (bandas X e L, modo faixa larga) e **TM/Landsat** e, 2) imagens **SAR** e aerogeofísicas magnéticas e gamaespectrométricas. Esses autores, através da técnica transformação **IHS**, tinham como objetivos: 1) apresentar uma metodologia de integração de imagens **SAR** com outros dados de naturezas diferentes e, 2) discriminar litologias e padrões estruturais.

As imagens **SAR/TM** foram integradas efetuando-se a transformação **IHS** das bandas **TM1**, **TM2** e **TM3** e, **TM2**, **TM4** e **TM5**. Em ambos os casos, substituiu-se o canal intensidade (I) pela imagem **SAR**, mantendo-se a matiz (H) e a saturação (S) originais das imagens **TM/Landsat**.

Na integração das imagens **SAR/geofísicas**, utilizou-se a imagem radar para modular a intensidade (I) e, as geofísicas, de baixa resolução espacial para a prover na imagem final a matiz (H). Foram processadas duas rotinas de transformação **IHS** dos canais eU, eTh e %K. Na primeira rotina, foi processada a troca do canal intensidade (I) pela imagem **SAR**, conservando a matiz (H) e saturação (S) originais das imagens gamaespectrométricas. Na segunda rotina, promoveu-se as substituições: 1) troca do canal intensidade (I) pela imagem **SAR** e, 2) troca do canal saturação (S) pela

imagem contagem total (CT), preservando a matiz (H) original das imagens eU, eTh e %K. Os produtos finais, resultantes das integrações das imagens SAR/TM e SAR/geofísicas permitiram a discriminação de unidades litológicas e padrões estruturais, combinando: 1) informação de textura, 2) padrões topográficos e geológicos de superfície e subsuperfície e, 3) informações espectrais. No caso, das combinações imagens SAR/gamespectrométricas, as imagens finais foram adequadas, principalmente, no mapeamento de granitos e áreas com alteração hidrotermal.

Rolim (1993) integrou dados digitais de magnetometria (redução ao pólo e ao equador magnético; primeiro e segundo derivativos e continuação para cima) a partir do campo magnético total; TM/Landsat 5; geológicos e geobotânicos da área do Pojuca. Esta integração, via sistema de informações geográficas e de processamento digital de imagens, visava a discriminação de litologias e de padrões estruturais associados às informações magnéticas e espectrais. Para integração das imagens digitais magnetométricas e TM/Landsat 5, utilizou-se a transformação IHS, a qual propiciou a obtenção de um produto que gerou os seguintes resultados: 1) informações adicionais em relação às feições texturais e topográficas da área, permitindo subdivisões do Complexo Xingu e Gr. Rio Fresco, que se apresentavam indiferenciados nos mapeamentos anteriores e 2) a confirmação da maioria das classes geobotânicas mapeadas por Parrella et al. (1994).

Com base nesta revisão bibliográfica, para a integração das imagens gama desta pesquisa com as TM/Landsat, foi selecionada a transformação IHS. Essa técnica foi escolhida, porque além das características mencionadas acima, a componente I facilita a percepção pelo sistema visual humano. Essa propriedade faz da transformação IHS, a mais eficiente para integrar imagens de diferentes resoluções e naturezas. Assim, foram utilizadas para a integração das imagens gama e TM/Landsat, duas metodologias conforme estabelecidas na Figuras 4.4.

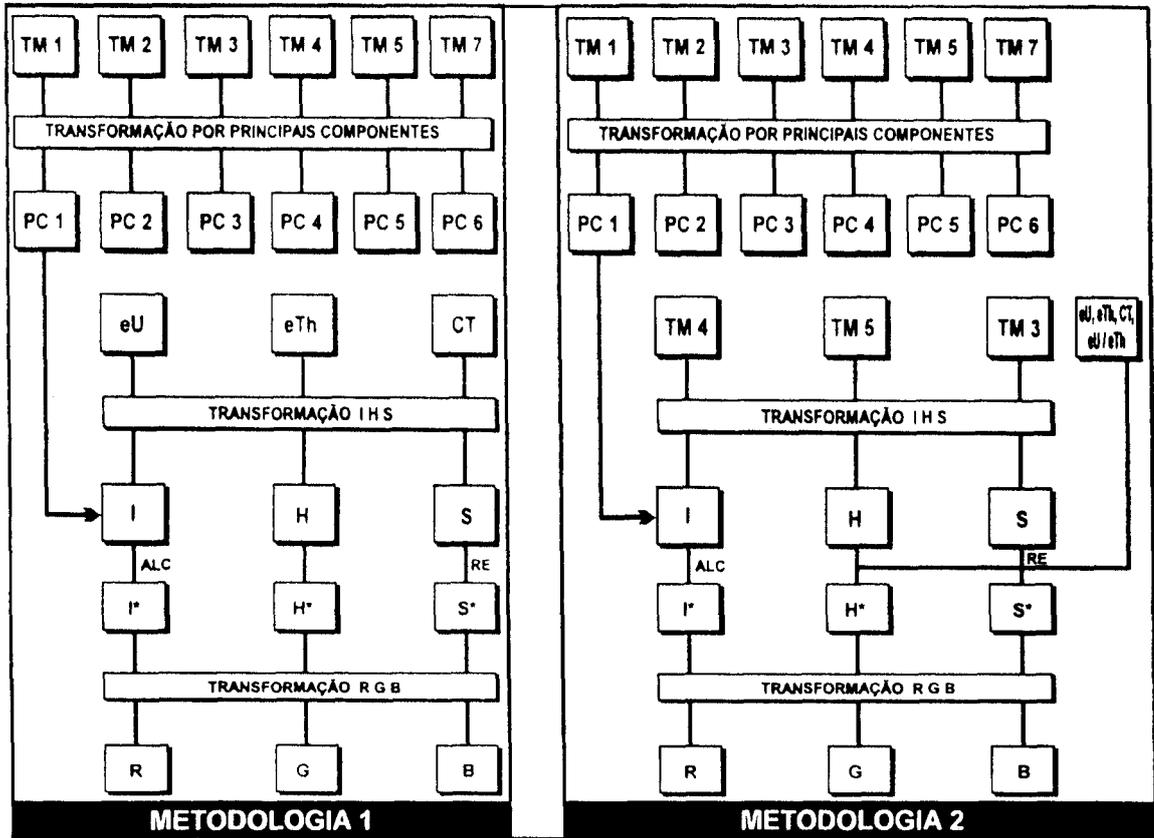


Fig. 4.4 - Metodologias de processamento para integração das imagens gama e TM/Landsat, estabelecidas na investigação.

Na metodologia 1 aplicou-se a transformação IHS aos canais U, Th e CT, enquanto na metodologia 2 empregou-se essa técnica de realce às bandas TM3, TM4 e TM5. As bandas TM3, 4 e 5 foram escolhidas baseado em Paradella et al. (1989), que usou o fator de índice ótimo como critério de seleção dos melhores canais TM para geração de composições coloridas. Os procedimentos operacionais empregados nas duas metodologias foram: 1) aplicação da transformação por componentes principais as seis bandas TM/Landsat; 2) equalização das médias dos canais U, Th e CT (metodologia 1) e TM3, TM4 e TM5 (metodologia 2) e 3) cálculo dos parâmetros I, H e S. Em seguida, promoveu-se as seguintes manipulações dos parâmetros I, H e S; (a) substituição do canal I pela primeira componente (PC1), aplicando-se o ALC; (b) rotações da matiz (H) e (c) reescalonamento dos canal S. Finalizadas tais manipulações retornou-se ao espaço RGB.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **5.1 - FOLHA SERRA DOS CARAJÁS**

##### **5.1.1 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA**

O procedimento adotado para analisar, interpretar e estabelecer a relação entre as respostas radiométricas (geofísicas) e as unidades litoestratigráficas desta folha, foi baseado na combinação do mapa geológico elaborado pela CPRM (1991) com as imagens gama individuais e combinadas. Esse estudo da relação entre a radiometria gama e a geologia da área de estudo, foi conduzido inicialmente para a Folha Serra dos Carajás (área com 56,5 x 56,5 km<sup>2</sup>), a fim de se conhecer e caracterizar radiometricamente as unidades litoestratigráficas regionais, mapeadas na escala 1:250.000 pela CPRM. Além disso, tentou-se verificar se os dados gamaespectrométricos do PGBC, quando transformados em imagens digitais com resolução de 125 x 125 m, são passíveis para a extração de informações geológicas. Buscou-se com isto, subsidiar, posteriormente, os trabalhos de semi-detalhe referentes à discriminação de rochas na Área do Pojuca (área de 15,4 x 15,4 km<sup>2</sup>).

A caracterização geológico-geofísica da Folha Serra dos Carajás, iniciou-se com a análise e interpretação das imagens gama individuais e, em seguida, de suas combinações. Desta forma, serão descritos abaixo, primeiramente, os resultados obtidos das imagens gama individuais e, posteriormente, àqueles da combinação dessas imagens.

##### **5.1.1.1 - IMAGENS GAMA ISOLADAS**

As imagens gama foram analisadas uma a uma, buscando-se caracterizar qualitativamente a separabilidade entre as unidades litoestratigráficas. Além disso, tentou-se identificar qual das imagens apresentaria uma maior variação de respostas radiométricas que estivessem coincidentes com as unidades já mapeadas pela CPRM (1991). A partir dessa análise visual de cada imagem gama, considerando a presença de bordas, ou seja, a passagem de um padrão de resposta radiométrico para outro, foi pos-

sível elaborar a Tabela 5.1, que sintetiza e apresenta o grau de separabilidade entre as unidades litoestratigráficas da Folha Serra dos Carajás.

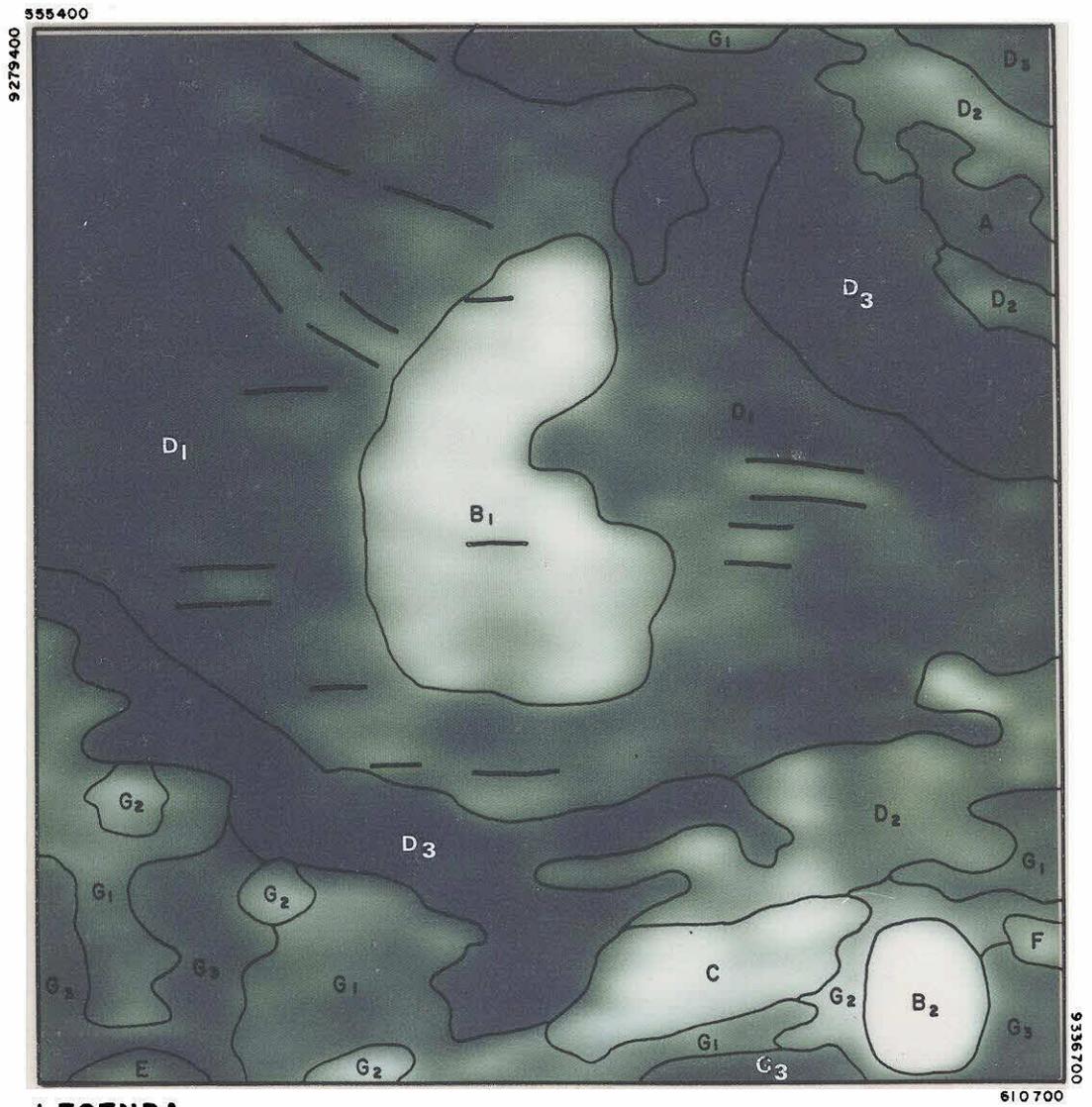
**TABELA 5.1 - GRAU DE SEPARABILIDADE ENTRE AS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DA FOLHA SERRA DOS CARAJÁS**

UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	GRAU DE SEPARABILIDADE - IMAGENS GAMA			
	eU	eTh	CT	eU/eTh
Complexo Xingu - Complexo Pium	moderado	alto	alto	-
Gr. Sapucaia - Complexo Xingu	-	-	moderado	-
Suíte Plaquê - Complexo Xingu	moderado	alto	alto	moderado
Gr. Grão Pará - Complexo Xingu	moderado	alto	alto	muito baixo
Suíte Granítica Anorogênica - Complexo Xingu	alto	muito alto	muito alto	baixo
Gr. Grão Pará - Granito Cent. Ser. dos Carajás	muito alto	muito alto	muito alto	moderado
Cobertura laterítica - Gr. Grão Pará	alto	alto	alto	alto

Da análise da tabela acima, pôde-se concluir que as imagens gama eTh e CT são as que possuem uma maior variação de respostas radiométricas (bordas), sendo portanto, as mais indicadas para o mapeamento das unidades geológicas da folha Serra dos Carajás. Percebe-se que as separações entre unidades metassedimentares e de filiação ácida e, mesmo entre grupamentos litológicos de natureza ácida, estão bem definidas em todas as imagens, exceto na imagem eU/eTh. A seguir, serão descritos os resultados obtidos da interpretação visual das imagens CT, eU e eTh, considerando como subsídios principais para tais caracterizações as informações da Tabela 5.1, do mapa geológico elaborado pela CPRM (1991) e, principalmente, as variações de cinza, que propiciaram a individualização de domínios e subdomínios radiométricos nas imagens gama.

#### **- IMAGEM CONTAGEM TOTAL (CT)**

Optou-se pela descrição, inicialmente, da imagem CT (Figura 5.1), para o estabelecimento da correspondência entre os domínios radiométricos e as unidades litoestratigráficas, porque esta imagem contém informações radiométricas integradas (variações de tonalidades de cinza) provenientes dos radioelementos U, Th e K.



**LEGENDA**

DOMÍNIOS E SUBDOMÍNIOS RADIOMÉTRICOS

- A
- B<sub>1</sub> B<sub>2</sub>
- C
- D<sub>1</sub> D<sub>2</sub> D<sub>3</sub>
- E
- F
- G<sub>1</sub> G<sub>2</sub> G<sub>3</sub>

~ CONTATO RADIOMÉTRICO

— ALINHAMENTO RADIOMÉTRICO

ESCALA

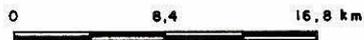


Fig. 5.1 - Imagem CT mostrando os domínios e subdomínios radiométricos detectados.

Na imagem CT, como verificado na figura acima, foi possível identificar 07 (sete) domínios radiométricos, que no geral, apresentam limites coincidentes com os contatos geológicos do mapa da CPRM (1991). Tais domínios serão descritos a seguir, levando-se em conta suas correlações espaciais com as unidades litológicas.

#### • Domínio G

O domínio G, presente nas porções sul e norte da área, corresponde espacialmente ao Complexo Xingu. Este domínio definido na imagem CT, caracteriza-se pela presença de três subdomínios radiométricos  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ . Os subdomínios  $G_1$  com níveis de cinza médios, o  $G_2$  com respostas radiométricas mais altas (níveis de cinza mais claros) e o  $G_3$  com níveis de cinza mais baixos, estão associados aos diferentes tipos litológicos desse embasamento cristalino. Desta forma, sugere-se baseado nas respostas radiométricas que os níveis de cinza: 1) médios ( $G_1$ ), correlacionam-se às rochas migmatíticas com enclaves de anfibólitos; 2) altos ( $G_2$ ), estejam associados aos gnaisses granodioríticos e graníticos (trondhjemtos) e 3) baixos, ( $G_3$ ) correspondam, possivelmente, às áreas de predomínio e de rochas tonalíticas, composicionalmente mais sódicas, que devem explicar as baixas respostas radiométricas.

#### • Domínio F

O domínio F, de ocorrência bastante limitada, está presente na região sudeste da área. Esse domínio correspondente espacialmente ao Complexo Pium, está bem individualizado na imagem CT, apresentando-se caracterizado por uma resposta radiométrica alta. Sugere-se, portanto, que essas respostas radiométricas sejam provenientes da associação dos litótipos enderbíticos ou charnockíticos desse complexo.

#### • Domínio E

O domínio E, localizado no extremo oeste da imagem CT, corresponde espacialmente ao Grupo Sapucaia. Esse domínio de ocorrência muito limitada na área de estudo, caracteriza-se por uma resposta radiométrica relativamente baixa. Esta resposta pode apresentar-se como consequência da associação litológicas, tais como: metamafitos, meta-ultramafitos e metassedimentos (CPRM, 1991).

### • Domínio D

É o domínio com maior distribuição geográfica na imagem CT, estando associado ao Grupo Grão Pará. Esse domínio apresenta-se dividido em três subdomínios radiométricos, denominados  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ .

O subdomínio  $D_1$  ocorre na faixa central da imagem CT, relacionando-se a Formação Águas Claras (CPRM, 1991) ou Grupo Rio Fresco (DOCEGEO, 1988). Em geral, esse subdomínio apresenta-se caracterizado por uma variação de respostas radiométricas baixas, médias e altas, que estão associadas às variações de tonalidades de cinza médio alto a escuro. Sugere-se, assim, que os níveis radiométricos mais altos presentes nestas unidades, de acordo com a Tabela 3.3 (Capítulo 3), associem-se aos metargilitos e metarenitos conglomeráticos subarcoseanos. Por outro lado, propõe-se que, os níveis radiométricos mais baixos dessas unidades estejam relacionados aos metarenitos e metassiltitos do Gr. Rio Fresco (DOCEGEO, 1988).

Relacionado, ainda a subdomínio  $D_1$ , ocorrem alinhamentos radiométricos de direções preferenciais E-W e NW-SE. Os alinhamentos E-W são encontrados com maior frequência que os NW-SE, sendo ambos considerados como lineamentos estruturais que compõem as zonas de cisalhamento dúcteis do cinturão Itacaiúnas (Sistema Taranscorrente Serra dos Carajás). É importante destacar que na análise comparativa com o mapa da CPRM (1991), os alinhamentos E-W são informações novas.

Os subdomínios  $D_2$  e  $D_3$ , localizados nas áreas sul e nordeste da imagem CT, apresentam-se associados às formações Parauapebas e Carajás. O subdomínio  $D_2$ , caracterizado pelos mais altos níveis radiométricos desse domínio, equivalem provavelmente às rochas de filiação ácida da Fm. Parauapebas, representadas por meta-dacitos e metariolitos. O subdomínio  $D_3$  correspondente aos mais baixos níveis radiométricos da imagem, associam-se provavelmente às rochas de filiação básica da Fm. Parauapebas (metabasaltos) e às formações ferríferas bandadas da Fm. Carajás.

### • Domínio C

O domínio C, encontrado na parte centro-sul da imagem CT, correlaciona-se espacialmente a Suíte Plaquê. Com aspecto lenticularizado e orientado segundo a direção WSW-ENE, este domínio caracteriza-se por uma textura homogênea associada a um alto radiométrico. Esta resposta radiométrica deve-se à presença das rochas graníticas leucocráticas da Suíte Plaquê.

### • Domínio B

O domínio B, localizado nas partes central e sudeste da imagem CT, está dividido em dois subdomínios B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>. Esses subdomínios estão associados à Suíte Granítica Anorogênica, que se caracteriza pela presença dos mais altos níveis radiométricos da imagem CT.

O subdomínio B<sub>1</sub>, posicionado na parte central da folha, apresenta-se alongado segundo a direção N-S, correlacionando-se ao Granito Central Serra dos Carajás. Este subdomínio está bem definido, uma vez que é muito alto o contraste entre a resposta radiométrica entre o granito e os metassedimentos da Fm. Águas Claras ou Gr. Rio Fresco, onde está encaixado. Percebe-se nesse subdomínio uma heterogeneidade radiométrica, marcada por uma variação de níveis de cinza alto a muito alto, que pode estar refletindo as diferenças composicionais desta unidade granítica, que é composta por vários maciços intrusivos (Hirata, 1982).

O subdomínio B<sub>2</sub>, com aspecto circular/elíptico, está posicionado no extremo sudeste da imagem CT. Esse subdomínio com uma textura homogênea, corresponde a um plúton granítico intrusivo da Suíte Granítica Anorogênica mapeada pela CPRM (1991).

### • Domínio A

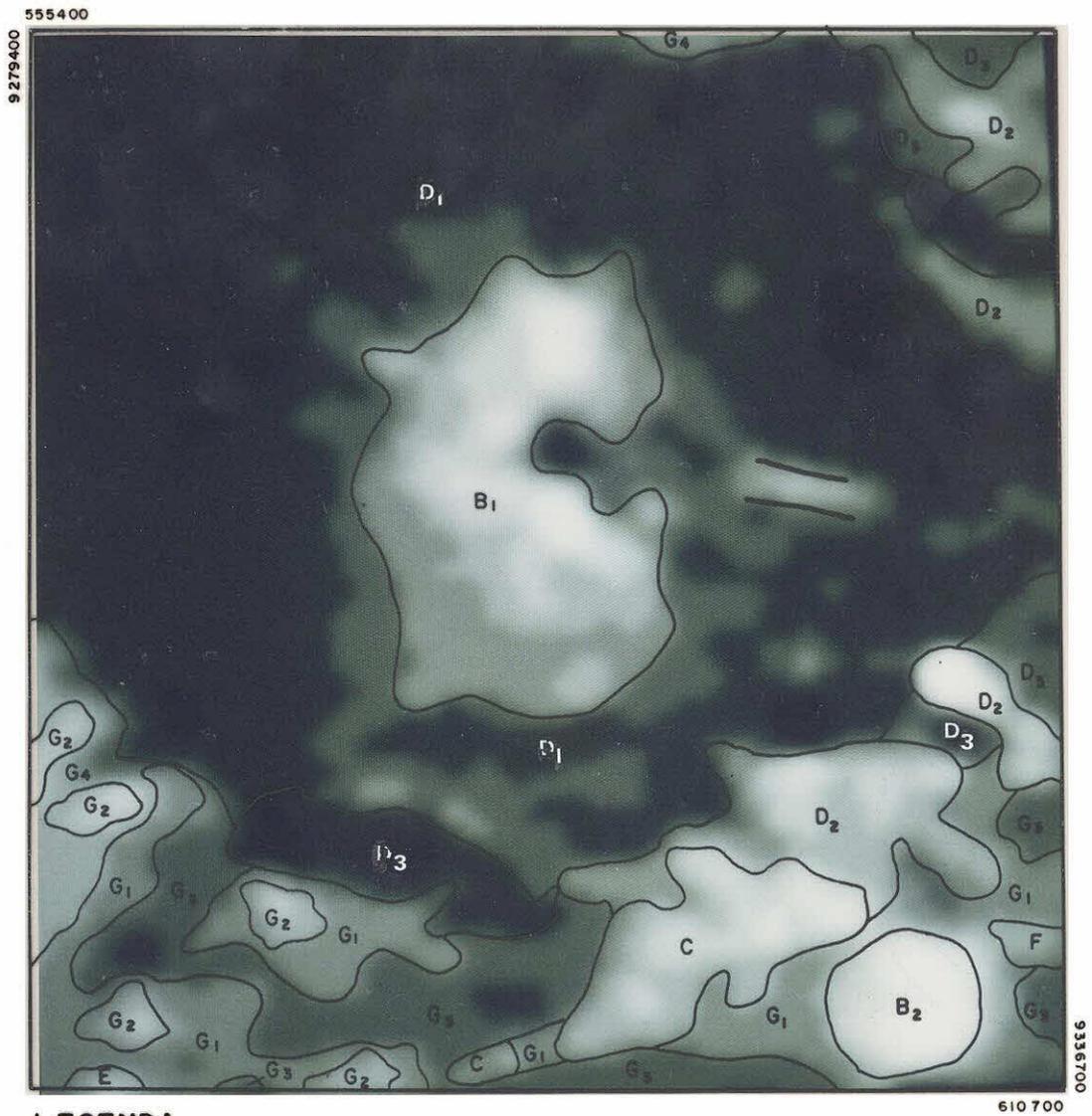
Esse domínio encontra-se localizado na região nordeste da área. Espacialmente ele corresponde à cobertura laterítica mapeada pela CPRM (1991), cujo nível radiométrico caracteriza-se por altos médios.

## - IMAGEM URÂNIO (eU)

Em linhas gerais, a imagem eU, comparativamente à imagem CT, apresenta diferenças quanto à sua divisão em domínios e subdomínios radiométricos. Analisando a imagem eU (Figura 5.2) identificou-se, novamente, 07 (sete) domínios radiométricos, através das variações dos níveis de cinza. Manteve-se para a caracterização dessa imagem, as mesmas denominações dos domínios radiométricos identificados na imagem CT, para facilitar as suas correlações e discussões. Desta forma, serão descritos a seguir, apenas os domínios radiométricos que apresentam diferenças em relação àqueles estabelecidos anteriormente. Verificou-se, então que os domínios da imagem U apresentam algumas discrepâncias aos identificados na imagem CT.

O domínio G, correspondente ao Complexo Xingu, apresenta-se na imagem eU caracterizado por 04 (quatro) níveis de cinza, que propiciaram à sua divisão nos subdomínios radiométricos  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$  e  $G_4$ . Desses subdomínios, apenas o  $G_2$  está coincidente espacialmente com o definido na imagem CT, enquanto os demais estão superpostos ou parcialmente coincidentes. Com base nas respostas radiométricas dos subdomínios na imagem, sugere-se que no  $G_2$  estejam presentes as rochas mais gnaíssicas do Complexo Xingu, enquanto que nos outros subdomínios, ocorram associações de rochas, onde ora predomina litologias mais sódicas ora menos sódicas. Assim, possivelmente o subdomínio  $G_3$ , correlacionaria com as rochas tonalíticas, enquanto o  $G_1$  e  $G_4$  estariam associados às rochas migmatíticas com enclaves de anfíbolitos e às rochas gnaíssicas, respectivamente.

O domínio E, identificado na imagem eU, apresenta uma alta resposta radiométrica, que pode estar correlacionando-se com os metassedimentos do Gr. Sapucaia.



**LEGENDA**

DOMÍNIOS E SUBDOMÍNIOS RADIOMÉTRICOS

- A
- B<sub>1</sub> B<sub>2</sub>
- C
- D<sub>1</sub> D<sub>2</sub> D<sub>3</sub>
- E
- F
- G<sub>1</sub> G<sub>2</sub> G<sub>3</sub> G<sub>4</sub>

-  CONTATO RADIOMÉTRICO
-  ALINHAMENTO RADIOMÉTRICO



ESCALA



Fig. 5.2 - Imagem eU mostrando os domínios e subdomínios radiométricos individualizados.

O domínio D, apresenta-se dividido nos mesmos três subdomínios radiométricos da imagem CT, denominados D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub>. Contudo, percebe-se na imagem eU, que estas divisões são bastantes diferentes daquelas da imagem CT, tanto pelas suas extensões quanto pelos posicionamentos. Verificou-se no quadrante nordeste da imagem, diferentes configuração e resposta radiométrica para o subdomínio D<sub>1</sub>, que exhibe uma dimensão maior do que àquela identificada na imagem CT e um padrão de cinza escuro homogêneo, que não reflete as variações litológicas da Fm. Águas Claras ou Gr. Rio Fresco.

Na faixa centro-sul da imagem eU, verificou-se a não continuidade do subdomínio D<sub>3</sub>, segundo a direção NW-SE, bem como sua nova configuração geométrica. Nesta região da imagem o subdomínio D<sub>2</sub> apresenta-se com uma resposta radiométrica mais alta do que àquela da imagem CT. Em termos de associação litológica, mantém-se aqui a mesma estabelecida para a imagem CT: D<sub>1</sub> = Gr. Rio Fresco; D<sub>2</sub> = rochas metavulcânicas ácidas da Fm. Parauapebas e D<sub>3</sub> = metavulcânicas básicas e formações ferríferas bandadas, da Fms. Parauapebas e Carajás, respectivamente.

O domínio C, com um arranjo geométrico diferente daquele da imagem CT, apresenta-se como um alto radiométrico com variações de cinza. Considera-se, portanto, que essa variação de textura, possivelmente, esteja associada às rochas graníticas mais e menos potássicas, ou seja, com diferentes composições mineralógicas e químicas.

Em relação ao domínio B, percebeu-se que o subdomínio B<sub>1</sub>, caracteriza-se pela presença de zonas com diferentes níveis de cinza, bem como por áreas levemente circulares com elevadas respostas radiométricas. Tal observação reforça a discussão anterior, que sugere a ocorrência de plútons graníticos com diferentes composições. No caso do subdomínio B<sub>2</sub>, observa-se apenas uma mudança de padrão geométrico e uma dimensão maior, mas com mesmo tipo de resposta radiométrica.

Em termos estruturais a imagem eU, não apresenta alinhamentos radiométricos como os detectados na imagem CT.

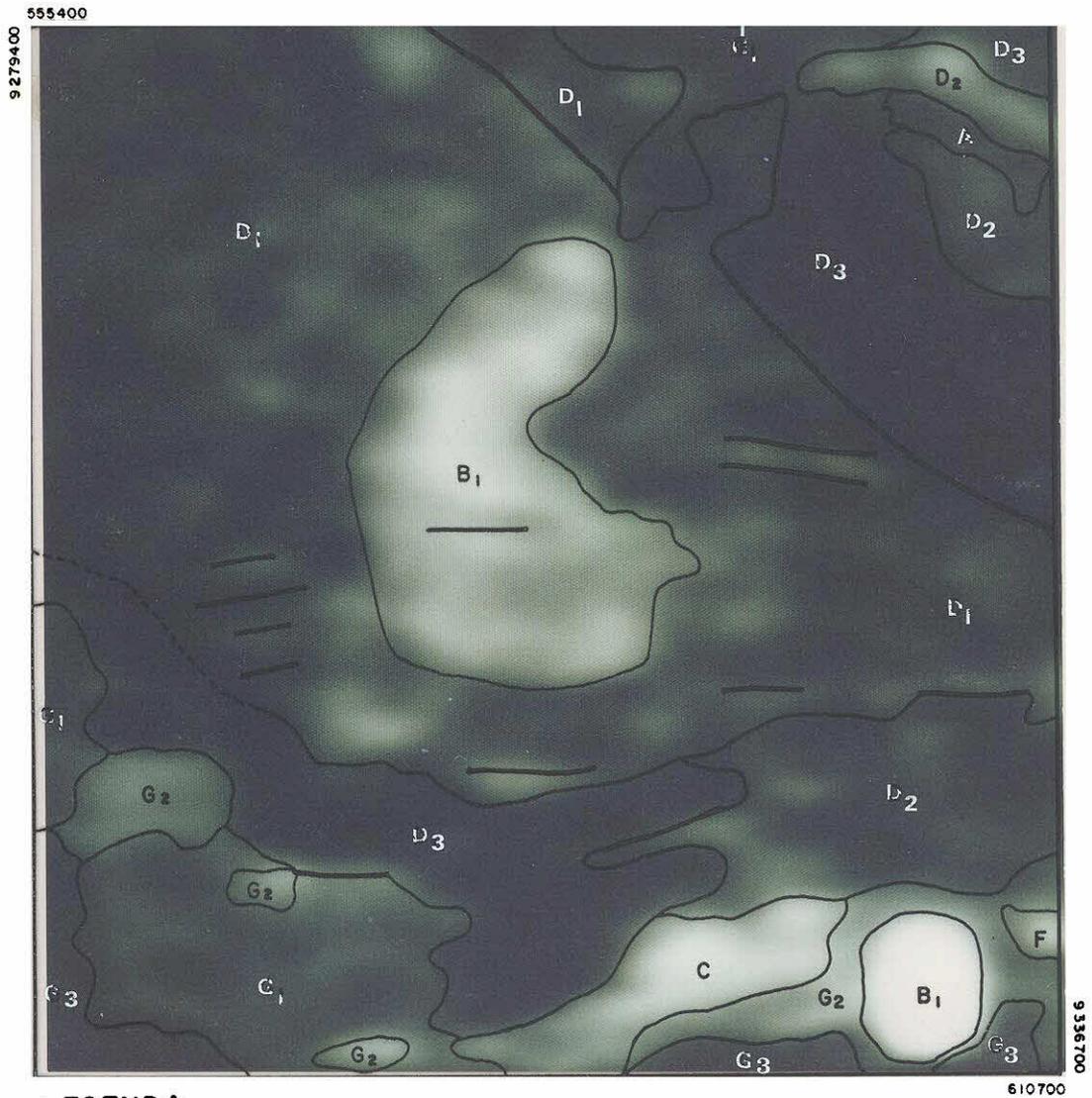
### - IMAGEM TÓRIO (eTh)

A partir da interpretação da imagem eTh (Figura 5.3) verificou-se: 1) a presença de 06 (seis) domínios radiométricos (A, B, C, D, F, e G) e 2) que as respostas radiométricas dessa imagem são mais similares àquelas da imagem CT do que eU. Contudo, observa-se algumas diferenças entre os contatos dos domínios G e D e de seus subdomínios radiométricos detectados na imagem Th em relação àqueles detectados nas imagens CT e eU. Desta forma, serão efetuadas abaixo algumas considerações sobre os domínios G e D.

O domínio G, baseado nas suas características radiométricas, foi dividido, novamente, nos três subdomínios  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$ , que se associam parcial ou completamente, àqueles identificados nas imagens CT e eU, havendo superposições e mudanças de dimensões. Destes subdomínios, apenas o  $G_2$  apresenta-se coincidente espacialmente com o subdomínio  $G_2$  identificado nas imagens CT e eU, porém com uma resposta radiométrica mais alta. Assim, em consequência das associações e correlações espaciais entre os domínios identificados nas imagens gama, sugere-se as mesmas associações de rochas anteriores, ou seja:  $G_1$  = rochas migmatíticas com enclaves de anfibolitos;  $G_2$  = rochas gnáissicas granodioríticas e graníticas e  $G_3$  = rochas tonalíticas.

O domínio D com uma textura bastante similar àquela da imagem CT, apresenta-se dividido nos mesmos subdomínios  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , que se correlacionam, respectivamente à Fm. Águas Claras ou Gr. Rio Fresco; à Fm. Parauapebas (metavulcânicas ácidas) e às Fms. Parauapebas e Carajás (metavulcânicas básicas e formações ferríferas bandadas), respectivamente.

Nesta imagem, pôde-se ainda identificar, alinhamentos radiométricos de direções E-W e NE-SW, que se distribuem em toda sua área. No quadrante nordeste da imagem, identificou-se um alinhamento radiométrico NW-SE de grande extensão, coincidente com o limite entre os subdomínios  $D_1$  e  $D_3$ , que provavelmente estaria associado à Falha Carajás. Os alinhamentos E-W, novamente, concentram-se mais principalmente no subdomínio  $D_1$ , que apresenta rochas com um elevado grau de fraturamento (CPRM, 1991).



**LEGENDA**

DOMÍNIOS E SUBDOMÍNIOS RADIOMÉTRICOS

- A
- B<sub>1</sub> B<sub>2</sub>
- C
- D<sub>1</sub> D<sub>2</sub> D<sub>3</sub>
- F
- G<sub>1</sub> G<sub>2</sub> G<sub>3</sub>

-  CONTATO RADIOMÉTRICO
-  ALINHAMENTO RADIOMÉTRICO
-  CONTATO RADIOMÉTRICO APROXIMADO

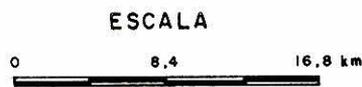


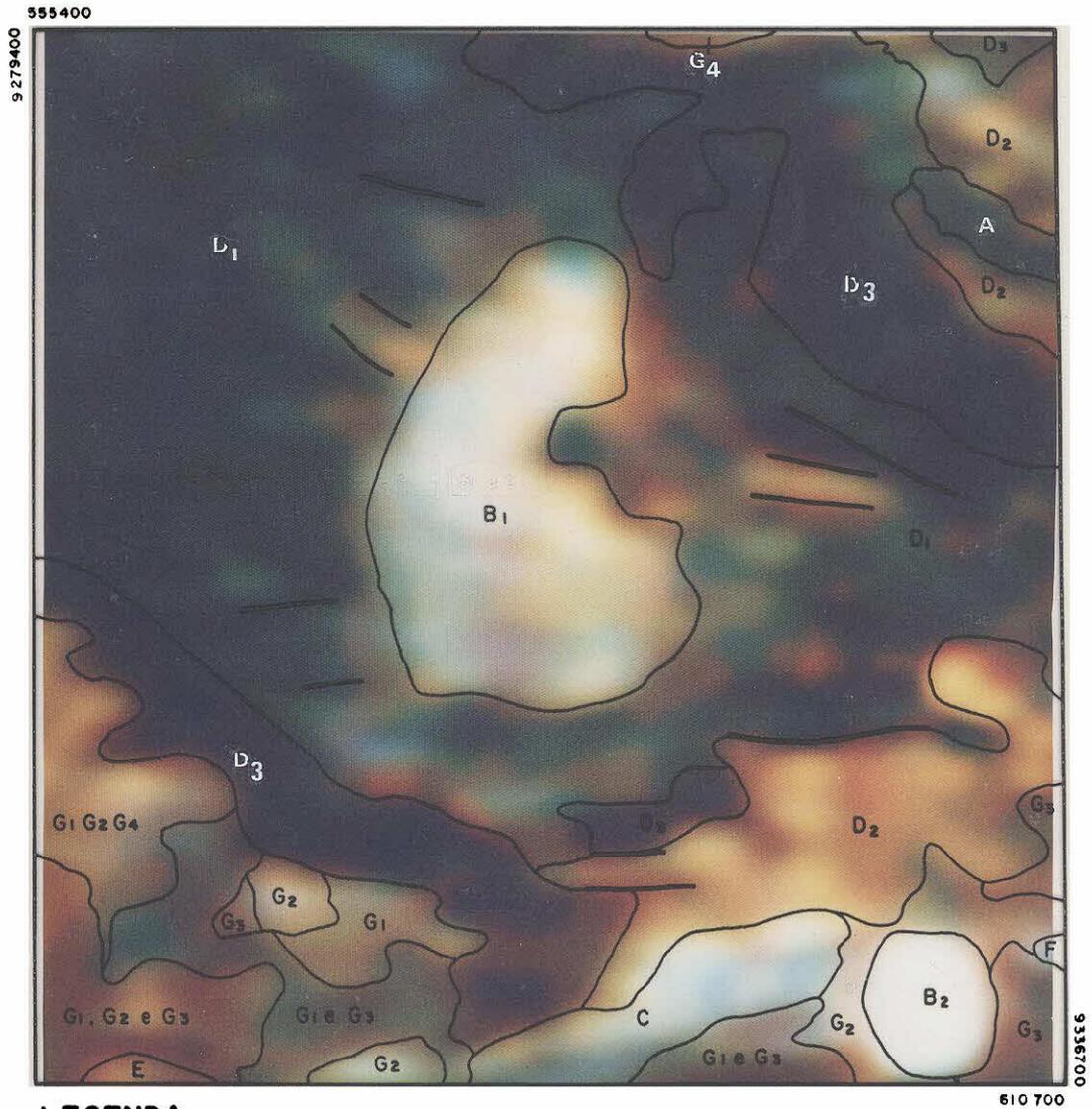
Fig. 5.3 - Imagem eTh mostrando os domínios e subdomínios radiométricos identificados.

### 5.1.1.2 - IMAGENS GAMA COMBINADAS

As imagens gama eU, eTh e CT foram combinadas no SITIM/INPE, utilizando-se as seguintes técnicas de realce: por composição colorida, transformação por componentes principais, decorrelação e transformação IHS. Para apresentação dos resultados da interpretação qualitativa e discussão, optou-se pela composição colorida **RGB**, porque as composições coloridas das componentes principais, decorrelação e transformação IHS propiciaram informações redundantes. Na combinação das imagens gama, via composição colorida **RGB**, associou-se aos canais vermelho (R), verde (G) e azul (B) as imagens eU, CT e eTh, respectivamente (Figura 5.4).

Nesta imagem **RGB**, em linhas gerais, as matizes equivalem às variações de respostas dos radioelementos U, Th e K (CT) associados aos canais RGB, refletindo um somatório das concentrações desse radioelementos presentes em cada canal (imagem gama). Desta forma, as regiões da imagem onde se encontram altas concentrações dos três radioelementos, predominam as cores mais claras, enquanto que as matizes escuras correspondem às áreas com mais baixas concentrações. Nesta imagem como ocorre uma combinação dos três canais gama eU, eTh e CT, é interessante observar que os domínios radiométricos, em muitos casos, foram facilmente delimitados devido à presença de bordas bem nítidas.

Foram identificados nesta composição colorida, produto da integração das imagens gama, um total de 07 (sete) domínios radiométricos equivalentes àqueles caracterizados anteriormente (imagens gama isoladas), matendo-se, portanto, às mesmas associações de rochas. Contudo, apenas para o domínio G<sub>3</sub> sugere-se alguns agrupamentos de subdomínios, tais como: G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> e G<sub>4</sub> e, G<sub>1</sub> e G<sub>3</sub>. Para o agrupamento G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> e G<sub>4</sub>, resulta a associações de rochas gnaissicas granodioríticas, graníticas e tonalíticas, enquanto para o G<sub>1</sub> e G<sub>3</sub> ocorrem rochas migmatíticas e tonalíticas. É importante mencionar que as variações de respostas dos agrupamentos podem estar associadas, ora com predomínio das gnaissicas ora das tonalíticas (G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> e G<sub>4</sub>), bem como da maior ou menor presença de rochas migmatíticas e tonalíticas para o G<sub>1</sub> e G<sub>3</sub>.



**LEGENDA**

DOMÍNIOS E SUBDOMÍNIOS RADIOMÉTRICOS

- A
- B<sub>1</sub> B<sub>2</sub>
- C
- D<sub>1</sub> D<sub>2</sub> D<sub>3</sub>
- E
- F
- G<sub>1</sub> G<sub>2</sub> G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> e G<sub>3</sub> G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> e G<sub>4</sub> G<sub>1</sub> e G<sub>3</sub>

- CONTATO RADIOMÉTRICO
- ALINHAMENTO RADIOMÉTRICO



**ESCALA**



Fig. 5.4 - Composição colorida eU(R), CT(G) e eTh (B) exibindo os domínios e subdomínios radiométricos identificados.

Em síntese, a partir da análise e interpretação das imagens gama, observou-se que: 1) as rochas metassedimentares e metabásicas apresentam-se caracterizadas por baixas respostas radiométricas, enquanto as meta-ácidas sempre estão associadas às áreas com mais altas respostas; 2) as imagens CT e eTh contém informações estruturais, através dos alinhamentos radiométricos que estão associados às direções preferenciais do lineamentos estruturais do cinturão Itacaiúnas e 3) foi possível individualizar dentro do Grupo Grão Pará (Fm. Parauapebas), rochas valores de níveis de cinza (altas respostas radiométricas) que provavelmente referem-se as litologias de natureza ácida desta sequência metavulcânica; 4) a composição colorida RGB, como produto da integração das imagens gama, apresentam bordas mais nítidas, quando comparadas aos canais individuais, o que facilita uma melhor separação entre as unidades; 5) as diferenças de respostas detectadas a partir da análise de cada imagem gama isolada podem, possivelmente, ser marcadas pela variação da características da cobertura vegetal, bem como pela contribuição do radioelemento K no canal CT e 6) que as imagens gama respondem bem para a identificação e separação das rochas ácidas de suas adjacentes metassedimentares.

## **5.2 - ÁREA DO POJUCA**

### **5.2.1 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA**

A caracterização geológico-geofísica da Área do Pojuca (interpretação qualitativa) foi conduzida em duas fases: 1) análise visual das imagens gama isoladamente e 2) interpretação das imagens gama combinadas através de composições coloridas. Utilizou-se, em ambas as fases, a comparação das imagens gama com os mapas de localização das descrições petrográficas e geológicos, através do SGI/INPE.

#### **5.2.1.1 - IMAGENS GAMA ISOLADAS**

Nesta fase, analisou-se inicialmente cada imagem gama, mediante a sua combinação com os dados de descrições petrográficas e, posteriormente, com os mapas geológicos elaborados pela DOCEGEO (1984) e UFPA (Macambira et al., 1990).

Através da combinação do mapa de localização de descrições petrográficas com as imagens gama, observou-se, que no geral, as rochas de filiação ácida estão situadas em altos radiométricos (áreas mais claras), enquanto as de filiação básica e sedimentares estão posicionadas em áreas com baixas e altas respostas geofísicas, respectivamente. Essas tendências de respostas radiométricas do conjunto de rochas presentes na área já eram esperadas, por estarem de acordo com as Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 (Capítulo 3), que exibem as concentrações dos radioelementos U, Th e K de litologias.

A partir da análise visual das imagens gama e da comparação com os mapas geológicos e de localização das descrições petrográficas, foi possível a elaboração da Tabela 5.1, que indica o grau de separabilidade das unidades litoestratigráficas mapeadas por Macambira et al. (1990), em relação a cada imagem gama.

**TABELA 5.2 - GRAU DE SEPARABILIDADE ENTRE AS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DA ÁREA DO POJUCA**

UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	GRAU DE SEPARABILIDADE - IMAGENS GAMA			
	eU	eTh	CT	eU/eTh
Complexo Xingu - Gr. Igarapé Pojuca	muito alto	muito alto	muito alto	alto
Gr. Igarapé Pojuca - Granito Itacaiúnas	moderado	baixo	baixo	alto
Gr. Igarapé Pojuca - Fm. Igarapé Azul	baixo	moderado	baixo	moderado

Observando-se a tabela acima, conclui-se que: 1) as imagens gama isoladas apresentam elevado potencial para separar as unidades litoestratigráficas Complexo Xingu e Gr. Igarapé Pojuca; 2) nenhuma das imagens gama apresentam bordas radiométricas capazes de propiciar a separação entre todas as unidades litoestratigráficas da área e 3) não foi possível separar visualmente em nenhuma das imagens, o Gr. Igarapé Pojuca e Fm. Águas Claras (ou Gr. Rio Fresco), porque tais unidades apresentam-se com respostas radiométricas similares, que dificultam a identificação de limites entre ambas. Todavia, considerando que as imagens gama foram analisadas, comparando-as com os mapas já citados anteriormente, pode-se estabelecer algumas correlações entre as respostas radiométricas de cada canal gama e as unidades litoestratigráficas. Tais correlações serão descritas considerando-se apenas as imagens eU, eTh e eU/eTh.

### - IMAGEM URÂNIO (eU)

Na imagem eU, identificou-se claramente a separação entre o Complexo Xingu e Gr. Igarapé Pojuca, através de uma borda radiométrica bem definida. Nesta imagem, o Complexo Xingu, ocupando quase toda parte N da imagem eU (Figura 5.5), apresenta-se caracterizado por altas respostas radiométricas, associadas aos níveis de cinza entre médio ( $D_1$ ) e alto (D) (Figura 5.7). Tais níveis, segundo o mapa de localização de descrições petrográficas correspondem às rochas gnaíssicas. Na ausência de dados petrográficos que esclareçam os níveis médio ( $D_1$ ) de respostas radiométricas, sugere-se que eles estejam associadas às rochas tonalíticas do Complexo Xingu.

Em relação ao Gr. Igarapé Pojuca, localizado na faixa central da imagem, através do mapas de descrições petrográficas e geológico (Macambira et al., 1990), verificou-se três padrões de respostas radiométricas, denominados  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ . Tais padrões de respostas radiométricas apresentam as seguintes correlações:  $C_1$  = meta-renitos da Fm. Gameleira;  $C_2$  e  $C_3$  = metagabros, anfíbolitos, formações ferríferas bandadas e xistos variados das Fms. Bueno e Corpo 4.

A Fm. Águas Claras (ou Gr. Rio Fresco), posicionado na porção sul da área, caracteriza-se por dois padrões de respostas radiométricas, identificados como  $B_1$  e  $B_2$ . Estes padrões não possibilitaram identificar ou até mesmo sugerir um contato radiométrico que separasse os grupos Rio Fresco e Igarapé Pojuca. O padrão  $B_1$ , com os mais baixos níveis radiométricos na imagem (cinza escuro), de acordo com o mapa de localização de descrições petrográficas, associa-se as seguintes litologias: meta-renitos, metagabros, formações ferríferas bandadas, anfíbolitos, xistos variados, que pertencem às Fm. Corpo 4, Fm. Bueno e Águas Claras ou Gr. Rio Fresco. O padrão  $B_2$ , sem associação com descrições petrográficas, pode estar correlacionado à presença dos metargilitos da Fm. Águas Claras ou Gr. Rio Fresco, baseado nas informações da Tabela 3.3 (Capítulo 3).

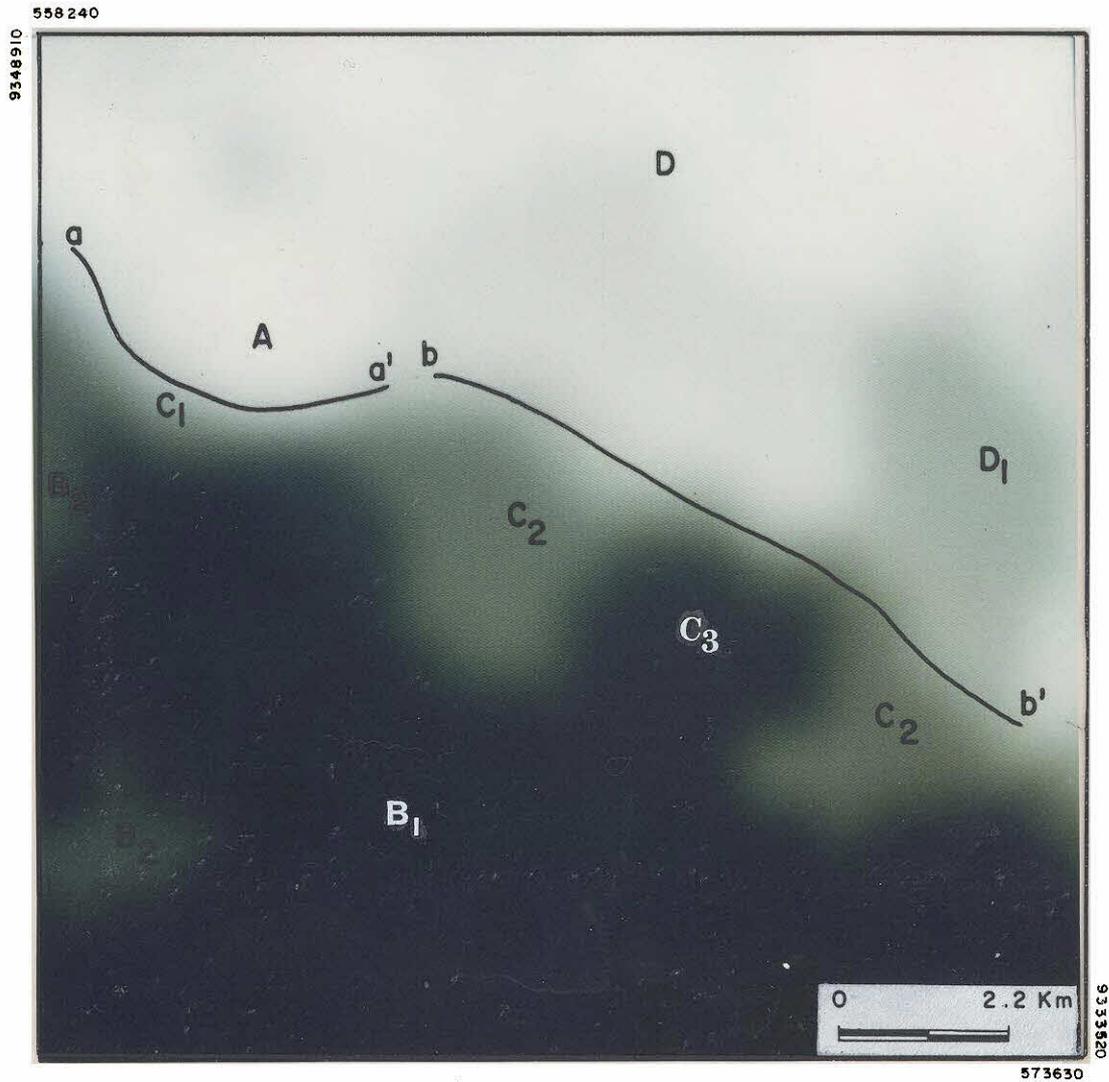


Fig. 5.5 - Imagem eU mostrando a separação entre o Complexo Xingu e Gr. Igarapé Pojuca (bb'), o limite inferior do granito Itacaiúnas e os padrões radiométricos detectados.

Em relação ao granito Itacaiúnas ou tipo Carajás, não foi possível identificar o seu limite superior que também o separa do Gr. Igarapé Pojuca. De acordo a comparação com os mapas geológicos da UFPA e DOCEGEO e de localização das descrições petrográficas, verificou-se que esse granito associa-se às respostas radiométricas mais altas da imagem eU.

### - IMAGEM TÓRIO (eTh)

Comparativamente a imagem eU, a imagem eTh apresenta o mesmo grau de separabilidade entre: 1) o Complexo Xingu e o Gr. Igarapé Pojuca; e 2) e o granito Itacaiúnas e o Gr. Igarapé Pojuca. Novamente, ficou difícil estabelecer visualmente, a separação entre os grupos Rio Fresco e Igarapé Pojuca, devido à presença de padrões de respostas radiométricas similares entre os dois grupos.

O Complexo Xingu (D), novamente está separado do Gr. Igarapé Pojuca, através de uma borda radiométrica, que é a principal feição da imagem eTh (Figura 5.6). Esta borda apresenta-se como um alinhamento radiométrico, que está associado a uma falha transcorrente sinistral (Macambira et al., 1990). Relacionado às radiometria gama, percebe-se na imagem eTh, que os litótipos do Complexo, apresentam-se com iguais respostas radiométricas, associada a uma textura mais homogênea que àquela correspondente na imagem eU.

O Gr. Igarapé Pojuca, apresenta-se caracterizado por três padrões de respostas radiométricas denominados de  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ . De acordo com o mapa de localização das descrições petrográficas, verificou-se a seguinte correlação entre os padrões e os litótipos:  $C_1$  = metarenitos (Fm. Gameleira);  $C_2$  = metagabros, anfíbolitos, formações ferríferas bandadas e xistos variados das Fms. Bueno e Corpo 4;  $C_3$  = anfíbolitos e formações ferríferas bandadas da Fm. Bueno.

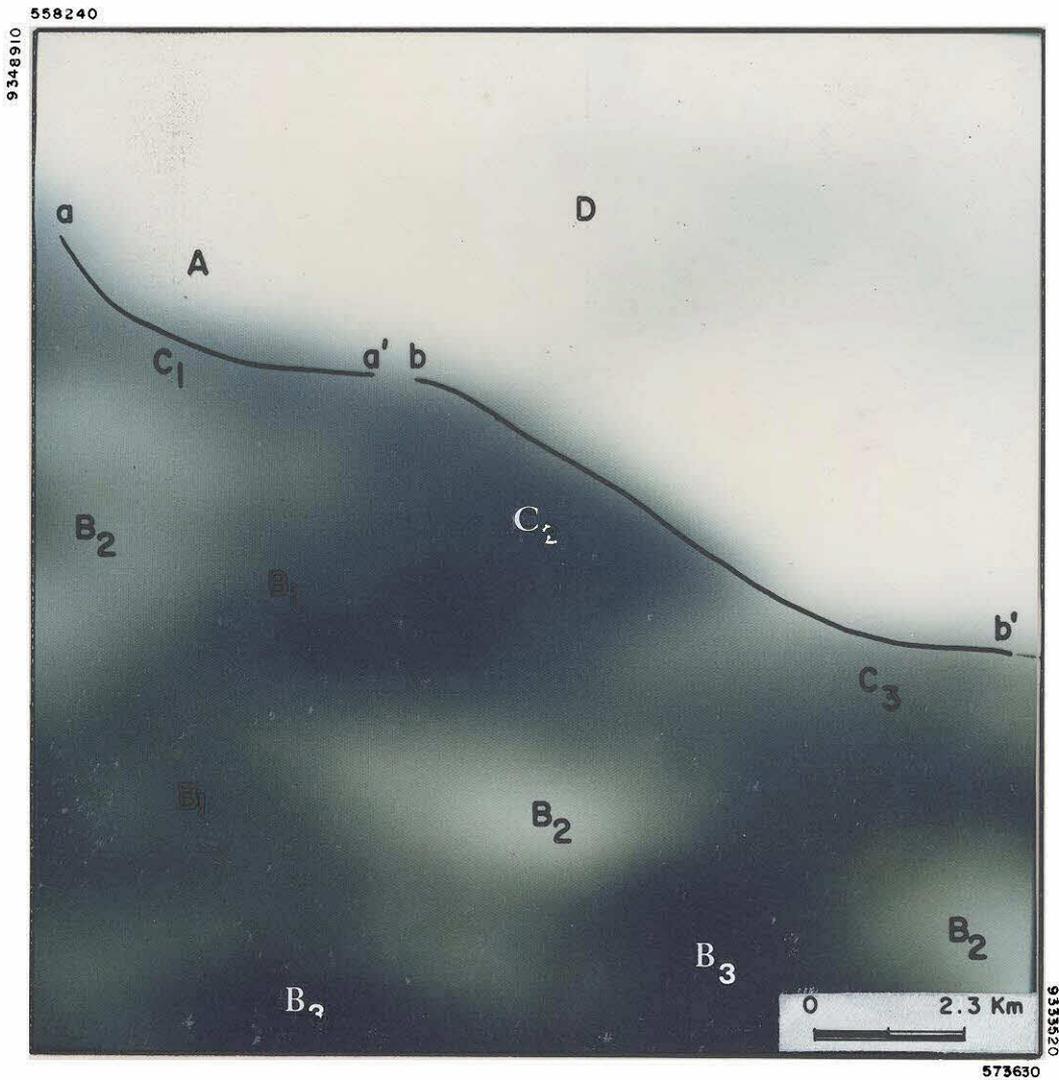


Fig. 5.6 - Imagem eTh exibindo a borda que separa o Complexo Xingu e Gr. Pojuca (bb'), o limite inferior do granito Itaciúnas (aa'), bem como os padrões radiométricos detectados.

A Fm. Águas Claras ou Gr. Rio Fresco, caracteriza-se na imagem eTh, por uma maior variação de respostas radiométricas que, àquela encontrada na imagem eU. Esta unidade litoestratigráfica apresenta três padrões de respostas radiométricas identificados como B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub>. Através do mapa de localização das descrições petrográficas, foi possível estabelecer uma equivalência litológica, apenas para o padrão B<sub>1</sub>, que se associa a metarenitos. De acordo com as litologias do Gr. Rio Fresco e a Tabela 3.3 (Capítulo 3), sugere-se que o padrão B<sub>2</sub> correlacione-se com metargilitos, ficando o padrão B<sub>3</sub> sem correspondência litológica.

Em relação ao granito Itacaiúnas, novamente não foi possível definir espacialmente seus contornos radiométricos, uma vez que ele se apresenta caracterizado por uma alta resposta radiométrica, que equivale visualmente às respostas localizadas ao norte da imagem.

### **- IMAGEM eU/eTh**

A imagem eU/eTh, apresenta uma grande variação de tonalidades de cinza quando comparadas às imagens eU e eTh, que é o resultado das diferenças de respostas radiométricas dos canais eU e eTh. Essas variações possibilitaram a identificação dos padrões radiométricos D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub>; C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> e C<sub>3</sub>; B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub> e A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> (Figura 5.7), que se apresentam associados às mesmas unidade litoestratigráficas discutidas anteriormente.

As informações adicionais da imagem eU/eTh, quando comparadas as obtidas das imagens eU e eTh, são: 1) as subdivisões do Complexo Xingu em três padrões radiométricos e 2) a delimitação o granito Itacaiúnas, que foi dividido em dois padrões radiométricos, baseado no mapa geológico da UFPA (Macambira et al., 1990) e 3) a indicação do padrão C<sub>1</sub>, localizado na borda superior o domínio A, que está associado aos metarenitos da Fm. Gameleira. Os padrões D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> mostram que há diferenças litológicas dentro do Complexo Xingu, que podem ser individualizadas. Mediante estas respostas, que estão espacialmente relacionadas a pontos de descrições petrográficas de rochas gnaíssicas, sugere-se a correlação, a seguir: D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub> = gnaisses mais tonalíticos e D<sub>3</sub> = gnaisses granodioríticos e ou graníticos e vice-versa. A divisão do granito Itacaiúnas ou tipo Carajás em dois padrões de respostas radiométricas, pode estar associada à variação mineralógica detectada por Macambira et al. (1990), segundo o sentido E-W.

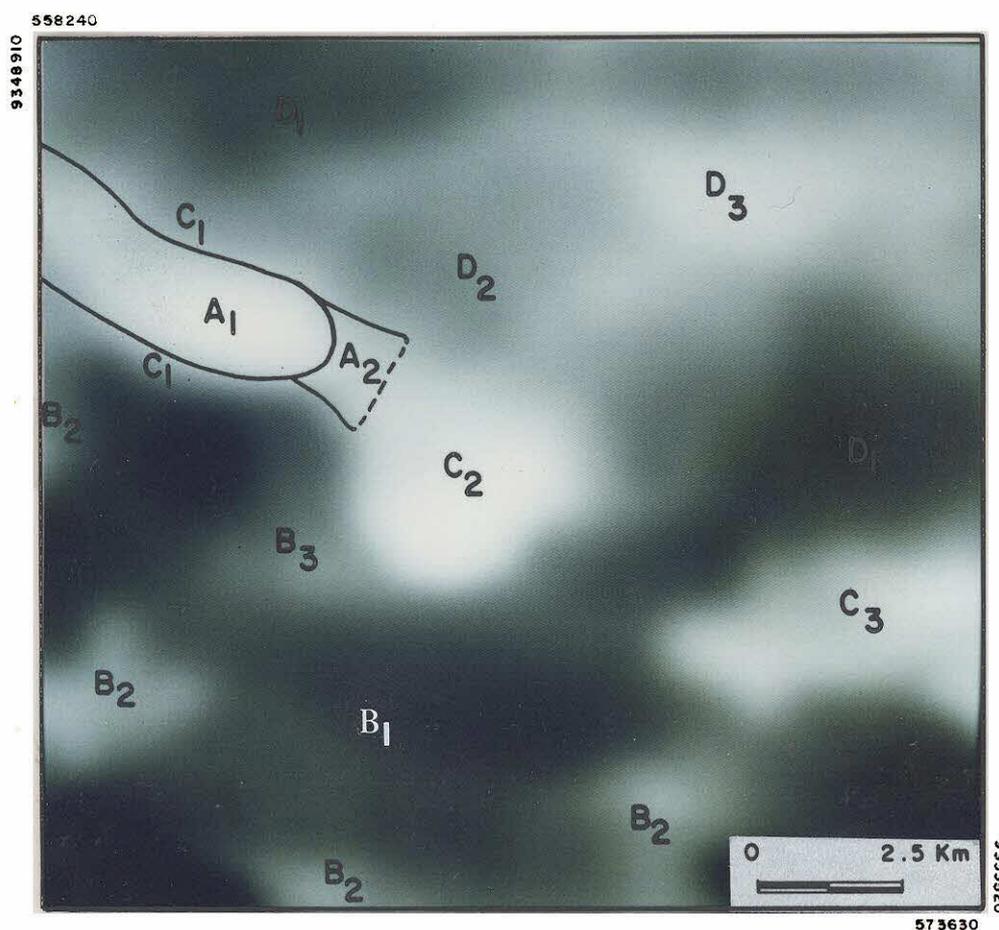


Fig. 5.7 - Imagem eU/eTh exibindo os contatos radiométricos do granito Itaciúnas, bem como os demais padrões radiométricos individualizados.

#### 5.2.1.2 - IMAGENS GAMA COMBINADAS

Interpretou-se a composição colorida **RGB** dos canais eU, eTh e CT decorrelacionados (Figura 5.8), porque este produto apresentou uma melhor performance que as imagens isoladas, permitindo identificar e separar padrões radiométricos correlacionados às unidades litoestratigráficas da área do Pojuca. Mediante às variações de matizes, foram identificados quatro domínios radiométricos, denominados: A, B, C e D, que serão descritos a seguir, mediante a comparação com os mapas geológicos e de descrições petrográficas.

### • Domínio D

Esse domínio correlacionado ao Complexo Xingu, apresenta uma variação de matizes ciano ( $D_1$ ), amarelo ( $D_2$  e  $D_4$ ) e magenta ( $D_3$ ), que conforme as informações dos mapas mencionados anteriormente, sugere-se as seguintes correlações:  $D_1$  = gnaisses tonalíticos;  $D_2$  e  $D_4$  = gnaisses migmatíticos e  $D_3$  = gnaisses granodioríticos e graníticos.

### • Domínio C

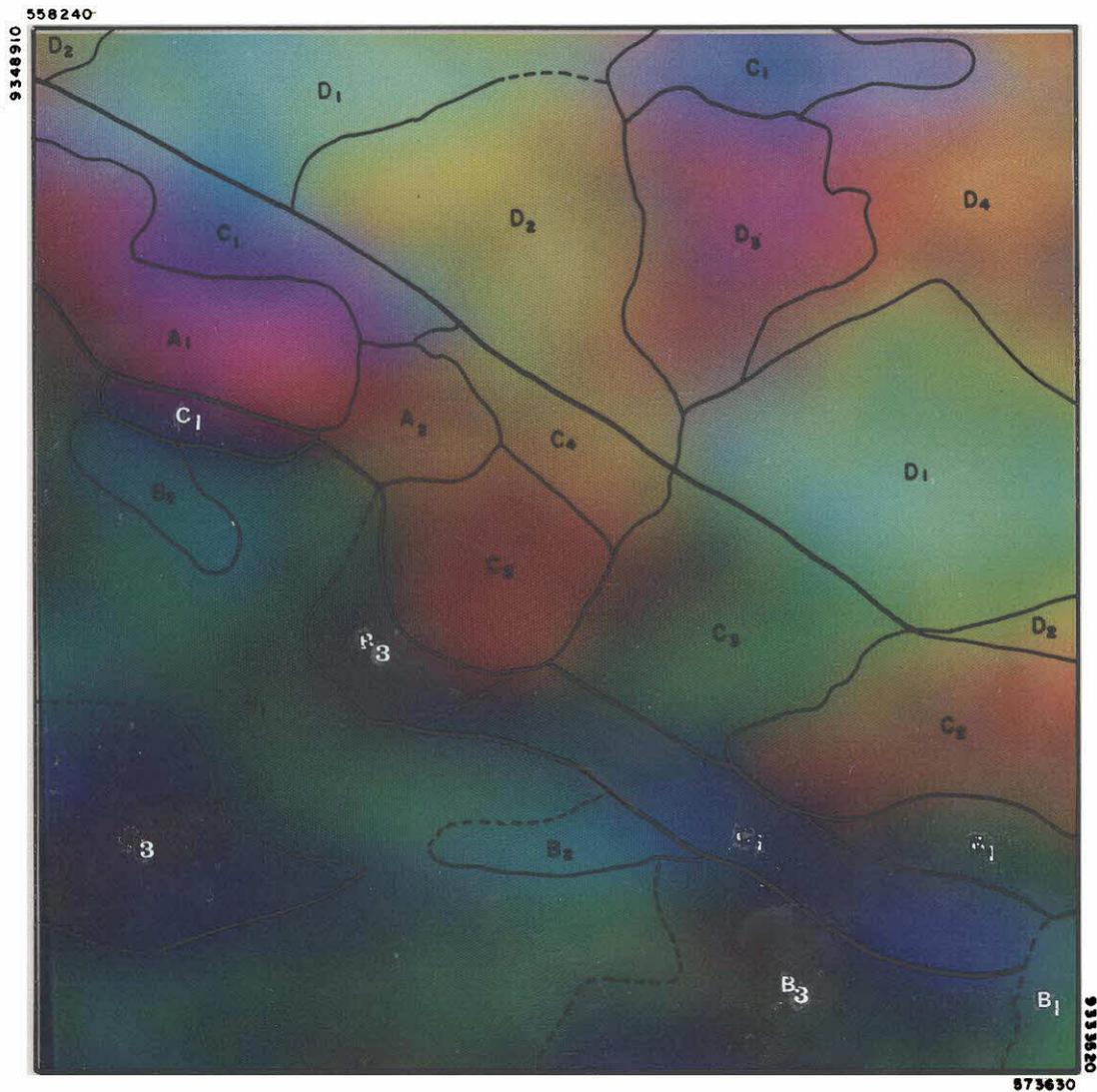
Esse domínio, correspondente espacialmente às unidades litológicas do Grupo Igarapé Pojuca, está dividido nos subdomínios:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$ . Estes subdomínios apresentam-se com definidos pelas matizes azul, vermelho-alaranjado, verde e amarelo-alaranjado, respectivamente. De acordo com o mapa de pontos petrográficos e geológicos da UFPA, associou-se domínios e unidades litoestratigráficas, da seguinte forma:  $C_1$  = metarenitos da Fm. Gameleira, com anfíbolitos associados;  $C_2$  = metagabros, anfíbolitos e formações ferríferas bandadas da Fm. Bueno;  $C_3$  = anfíbolitos e formações ferríferas e xistos variados das Fm. Bueno e Corpo 4 e  $C_4$  = anfíbolitos, anfíbolio xistos e xistos variados da Fm. Bueno.

### • Domínio B

O domínio B englobando os subdomínios  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ , correlaciona-se à Fm. águas Claras ou Gr. Rio Fresco. Este domínio caracteriza-se pela presença das matizes verde ( $B_1$ ), ciano ( $B_2$ ) e verde escuro/azul ( $B_3$ ), que correspondem provavelmente, à metarenitos, metargilitos e metassiltitos/metarenitos, respectivamente.

### • Domínio A

Esse domínio caracterizado pela cores magenta (subdomínio  $A_1$ ) e alaranjado ( $A_2$ ), está correlacionado ao granito Itacaiúnas ou tipo Carajás. Novamente associa-se esta divisão do granito em dois subdomínios, à diferença de composição mineralógica no sentido E-W (Macambira et al., 1990).



**LEGENDA**

DOMÍNIOS E SUBDOMÍNIOS RADIOMÉTRICOS

A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>		
B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	
C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	
D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>



CONTATO RADIOMÉTRICO



CONTATO RADIOMÉTRICO APROXIMADO



ALINHAMENTO RADIOMÉTRICO

ESCALA



Fig. 5.8 - Composição colorida dos canais eU, eTh e CT decorrelacionados, exibindo os domínios e subdomínios fotointerpretados.

### 5.2.2 - INTEGRAÇÃO DAS IMAGENS GAMA E TM/LANDSAT

A integração de imagens gama e TM/Landsat foi processada apenas para a Área do Pojuca, buscando a confirmação que a integração de dados de naturezas diferentes, como observado no item 4.1.2.4, é uma ferramenta poderosa para o mapeamento geológico, neste ambiente particular.

Partindo-se dessa premissa e de acordo com as metodologias de integração, via transformação IHS, estabelecidas no item 4.2.1.4, vários testes foram realizados envolvendo as manipulações dos parâmetros I, H e S. Das metodologias utilizadas, apenas a metodologia 1 (Figura 4.4) a propiciou a obtenção do melhor produto para interpretação visual qualitativa, conforme os seguintes procedimentos: 1) equalização das médias dos canais gama U, Th e CT; 2) troca do canal I pela primeira componente principal (CP1) das seis bandas refletidas do TM/Landsat; 3) rotação da matiz (H) e 4) reescalonamento da componente S.

A equalização das médias das imagens gama U, Th e CT, consistiu em somar um valor constante às bandas de menor média (U e Th), tal que se equiparassem à banda de maior média (U). Esta medida foi empregada aos canais originais, antes do cálculo dos parâmetros I, H e S, para se obter uma componente H, onde as intensidades das anomalias geofísicas estivessem distribuídas em todo espaço de cores RGB (Figura 5.9).

A rotação do canal H ( $22^\circ$ ), foi utilizada para melhorar a qualidade visual da imagem, que apresentava em algumas regiões, variações de matizes muito sutis, que dificilmente eram percebidas visualmente. Predominava na imagem antes da aplicação da rotação do canal H, as cores complementares (magenta, amarelo e ciano).

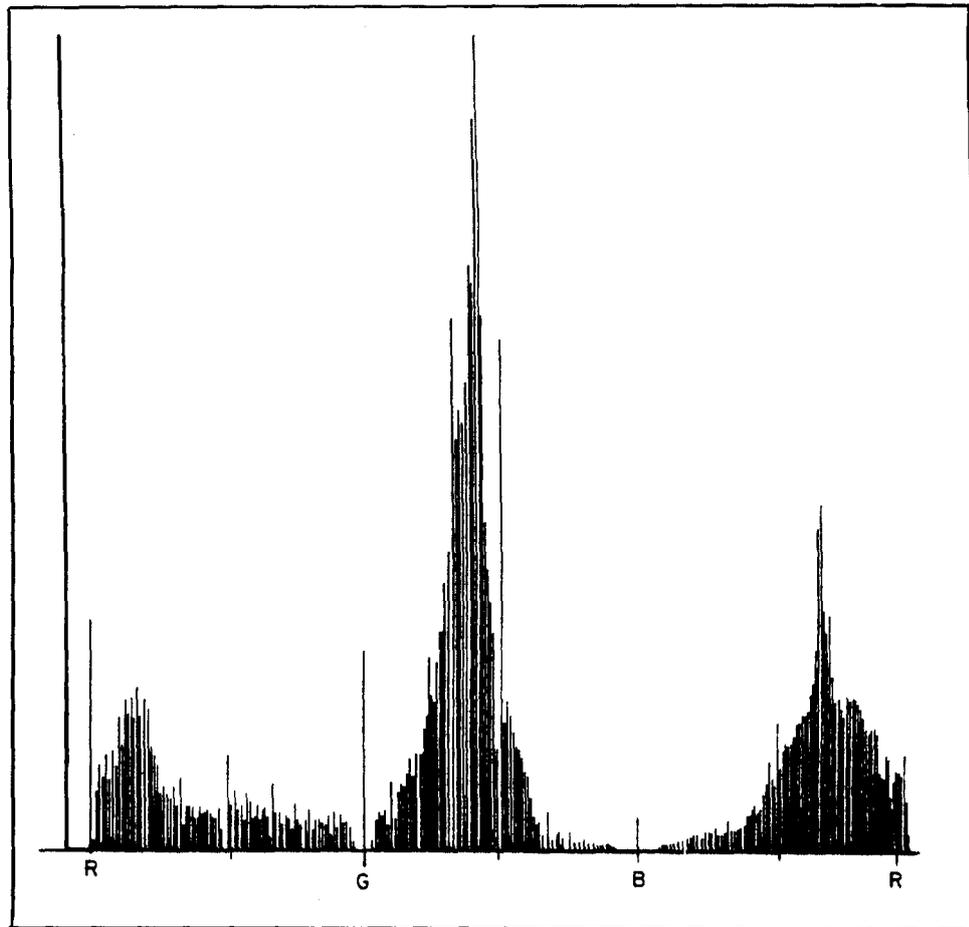


Fig. 5.9 - Histograma do canal H, mostrando a distribuição dos *pixels* no espaço de cores.

O quarto procedimento adotado, o reescalonamento da componente S, consistiu na adição de 50 níveis digitais ao canal original, com o objetivo de tornar as matizes mais vivas, ou seja, mais puras. Desta forma, o produto final obtido, após o retorno ao espaço RGB, exibiu uma variação de matizes distribuídas em todo esse espaço. Neste produto os altos valores radiométricos estão associados aos tons de vermelho; os intermediários aos tons de amarelo, verde e ciano e os mais baixos aos tons de azul.

A interpretação da imagem RGB (Figura 5.10), produto final obtido da transformação IHS, permitiu a individualização de cinco unidades fotogeológicas. Estas unidades fotogeológicas foram identificadas considerando-se dois tipos de informações principais: 1) a espacial das imagens TM/Landsat 5 (CP1) e 2) a radiométrica das imagens gama (eU, eTh e CT). Tais unidades, serão descritas a seguir, mediante a

comparação com os mapas geológicos e de localização de descrições petrográficas da área disponíveis para a área de estudo.

As unidades E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> e E<sub>4</sub>, localizadas na região norte da imagem, correspondem espacialmente ao Complexo Xingu. As unidades E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> com matizes vermelho e vermelho-alaranjado, textura rugosa associada a um relevo colinoso, equivale às áreas do Complexo Xingu com altos valores radiométricos. Estas características, quando combinadas com mapa de pontos petrográficos, indica que as unidades E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> estão associadas às rochas gnaissicas, que provavelmente, são de composição granodiorítica e ou granítica.

A unidade E<sub>3</sub> de cor amarelo-esverdeado, comparada à unidade E<sub>2</sub> apresenta-se com uma textura menos rugosa, e com níveis radiométricos intermediários. Portanto baseado nas informações discutidas anteriormente, associou-se esta unidade aos gnaisses migmatíticos do Complexo Xingu. A unidade E<sub>4</sub> caracterizada por uma textura menos rugosa que à textura da unidade E<sub>3</sub>, apresenta-se associadas aos níveis radiométricos mais baixos (matiz azul). Desta forma, sugere-se que esta unidade seja equivalente aos gnaisses tonalíticos desse complexo.

As unidades D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub> e D<sub>6</sub>, fortemente estruturadas segundo a direção NW-SE, separa-se do Complexo Xingu, através de um contato definido por uma falha transcorrente sinistral (Macambira et al. 1990). Estas unidades equivalem espacialmente ao Gr. Igarapé Pojuca. As unidades D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> e D<sub>3</sub> com matizes amarelo e amarelo-alaranjado, correspondem às litologias da Fm. Bueno. Estas unidades foram identificadas por apresentarem diferentes estruturação e resistência à erosão. De acordo com os mapas geológicos e de descrições petrográficas, indica-se a seguinte correlação: D<sub>1</sub> = anfibolitos e formações ferríferas bandadas; D<sub>2</sub> = rochas com alteração hidrotermal, metassedimentos pelíticos e formações ferríferas bandadas (DOCEGEO, 1984) e D<sub>3</sub> = metagabros, anfibolitos e formações ferríferas bandas.

As unidades D<sub>4</sub> e D<sub>5</sub>, associadas à Fm. Gameleira, apresentam-se com baixa resistência à erosão e com matizes de magenta e azul. Estes matizes, provavelmente, indicam diferenças litológicas dessa unidade litoestratigráfica, caracterizadas por metarenitos (Macambira et al., 1990). Esta unidade, aqui posicionada no Gr. Igarapé Pojuca, para a DOCEGEO (1988), equivale a um pacote de metassedimentos de baixo grau metamórfico, composto por metarenitos e metassiltitos com posição stratigráfica

indefinida. A unidade D<sub>6</sub> equivale à Fm. Corpo 4, compõem-se de formações ferríferas bandadas e xistos variados (anfíbios xistos, quartzo xistos) mapeada pela DOCEGEO (1984).

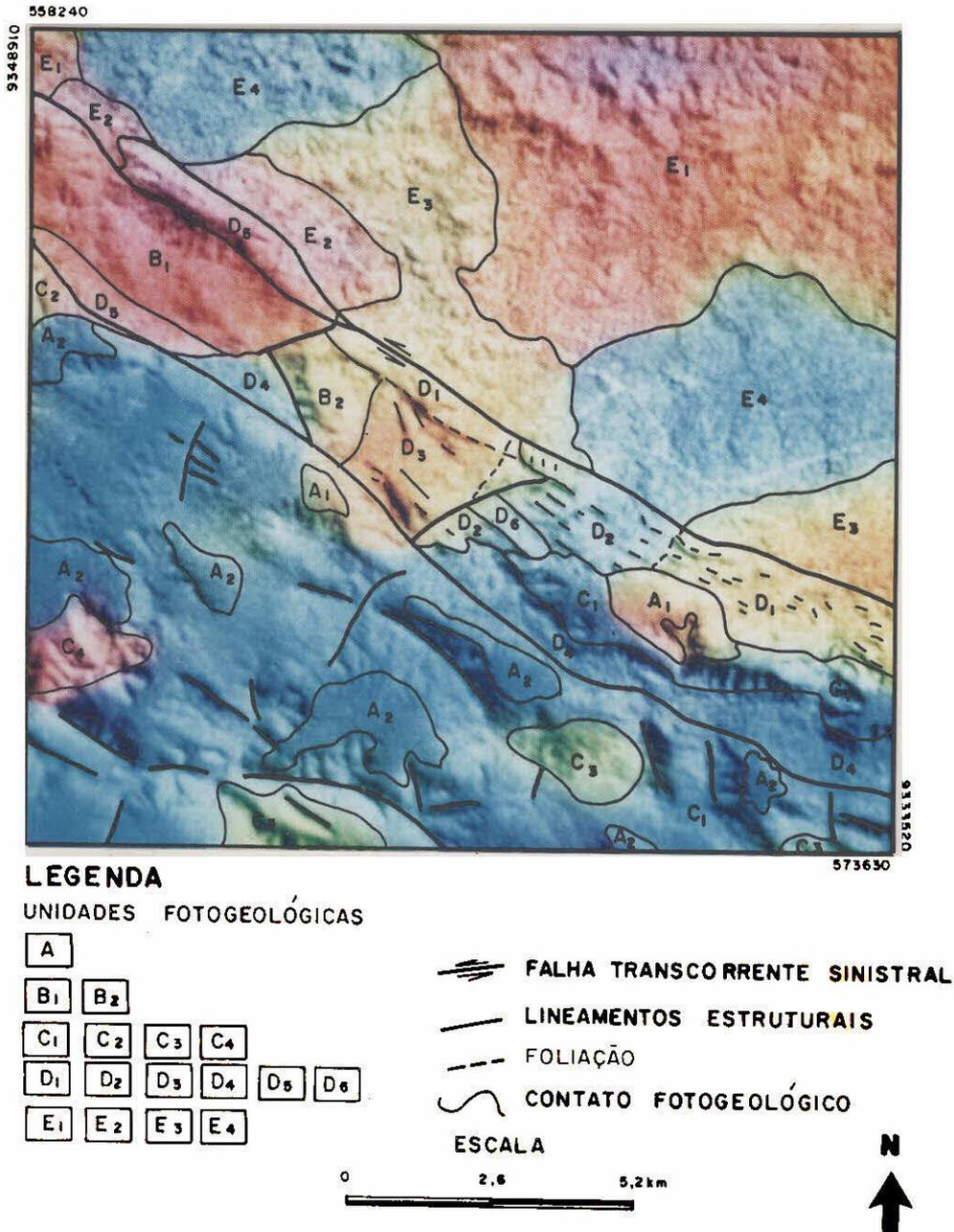


Fig. 5.10 - Produto final da transformação IHS, exibindo as unidades fotogeológicas individualizadas.

As unidades  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  localizadas na região sul da imagem correlacionam-se espacialmente à Fm. Águas Claras (ou Gr. Rio Fresco). A unidade  $C_1$ , com matizes azuis caracteriza-se por um relevo com altas altitudes, superfícies tabulares e unidades rochosas muito resistentes à erosão. Tal unidade, de acordo com o mapa de descrições petrográficas corresponde litologicamente aos metarenitos da Fm. Águas Claras. Ainda, em relação a unidade  $C_1$ , a interpretação visual proporcionou a identificação de lineamentos estruturais (falhas ou fraturas) orientados segundo as direções NW-SE, E-W e NE-SW. Desta forma, sugere-se que o contato entre a unidade  $C_1$  e o Gr. Igarapé Pojuca, seja tectônico. Devido a ausência de descrições petrográficas relacionadas às demais unidades do Gr. Rio Fresco, sugere-se a seguinte correlação;  $C_2$  e  $C_4$  = metargilitos e  $C_3$  = metarenitos subarcoseanos.

As unidades  $B_1$  e  $B_2$  correlacionadas espacialmente ao granito Itacaiúnas ou tipo Carajás, apresenta-se caracterizado por: 1) um aspecto circular/elíptico e com moderada resistência à erosão e 2) matizes magenta ( $B_1$ ) e amarelo-esverdeado. Considerando, essa variação de matizes, verificou-se que ela pode estar associada uma diferença de composição química e mineralógica descrita por Macambira et al. (1990), que observaram um aumento da quantidade de feldspatos potássicos (microclínio) e de pertitas, de leste para oeste ao longo do plúton granítico. Eles admitem também a ocorrência de dois corpos granitóides dentro do mesmo evento intrusivo.

As unidades  $A_1$  e  $A_2$  estão associadas às coberturas detríticos-lateríticas mapeadas pela (DOCEGEO, 1988) e Veneziani et al. (1994).

### 5.2.3 - CARACTERIZAÇÃO GEOBOTÂNICA-GEOFÍSICA

Nesta fase da pesquisa, buscou-se a verificação das correspondências entre as classes geobotânicas (Paradella et al, 1994) e as respostas radiométricas do conjunto de imagens gama. Esta verificação foi conduzida, via SGI/INPE, através da superposição dos planos: 1) mapa de classes geobotânicas e 2) as imagens gama isoladas e combinadas entre si. A partir da análise visual destes planos de informações superpostos, foi observado que há uma correlação espacial entre as grandes classes de vegetação (Figura 5.11) e as respostas radiométricas das imagens gama.

A Floresta Equatorial Ombrófila Densa, correlaciona-se com as classes geobotânicas A, B e C, associadas espacialmente às litologias do Gr. Rio Fresco

(classes B e C) e coberturas detrítico-lateríticas (classe A). De modo geral, esta grande classe de vegetação corresponde às áreas das imagens gama, que apresentam respostas radiométricas médias e baixas, caracterizadas por respostas radiométricas associadas: 1) nas imagens gama isoladas, às tonalidades de cinza escuro e médio e 2) na composição colorida dos canais eU, eTh e CT decorrelacionados aos matizes de ciano, verde e verde escuro.

A Floresta Equatorial Ombrófila Aberta representada pelas classes geobotânicas D e F, corresponde espacialmente às áreas de domínio do Complexo Xingu (classe F) e do Gr. Igarapé Pojuca (classe D). Estas classes de vegetação estão associadas às altas respostas radiométricas das imagens gama eU, eTh e CT. A classe F (gnaisses) apresenta-se na composição coloridas dos canais gama decorrelacionados associada matiz ciano esverdeado, enquanto a classe D relaciona-se com as cores amarelo e alaranjado-avermelhado.

A vegetação tipo Savanna (classe E), associada ao granito Itacaiúnas, apresenta-se correlacionada as mais altas respostas radiométricas das imagens gama referentes aos canais eU, eTh e CT. Tal fato deve-se à presença de rochas graníticas e a vegetação com baixa biomassa e clareiras naturais associadas às exposições de solo e ou afloramento de rochas.

A Floresta Aluvial ou de Baixio representada pela classe G, situa-se no domínio do Complexo Xingu. Em geral, esta floresta está associada aos mais baixos níveis de radiação do complexo, podendo ser explicado tais respostas devido à presença de áreas com excesso de umidade e às coberturas aluvionares recentes.

Destas correspondências acima, concluiu-se que, para este ambiente amazônico, a maior ou menor densidade de vegetação (biomassa), presença de umidade, bem como as diferentes estratificações do dossel (fisionomia vegetal), controlariam parcialmente, as respostas radiométricas das rochas. Estes fatores de acordo com Pereira e Nordemann (1983), atenuariam de 40 a 60% a radiação gama original emitida pelas rochas, dependendo da energia considerada.

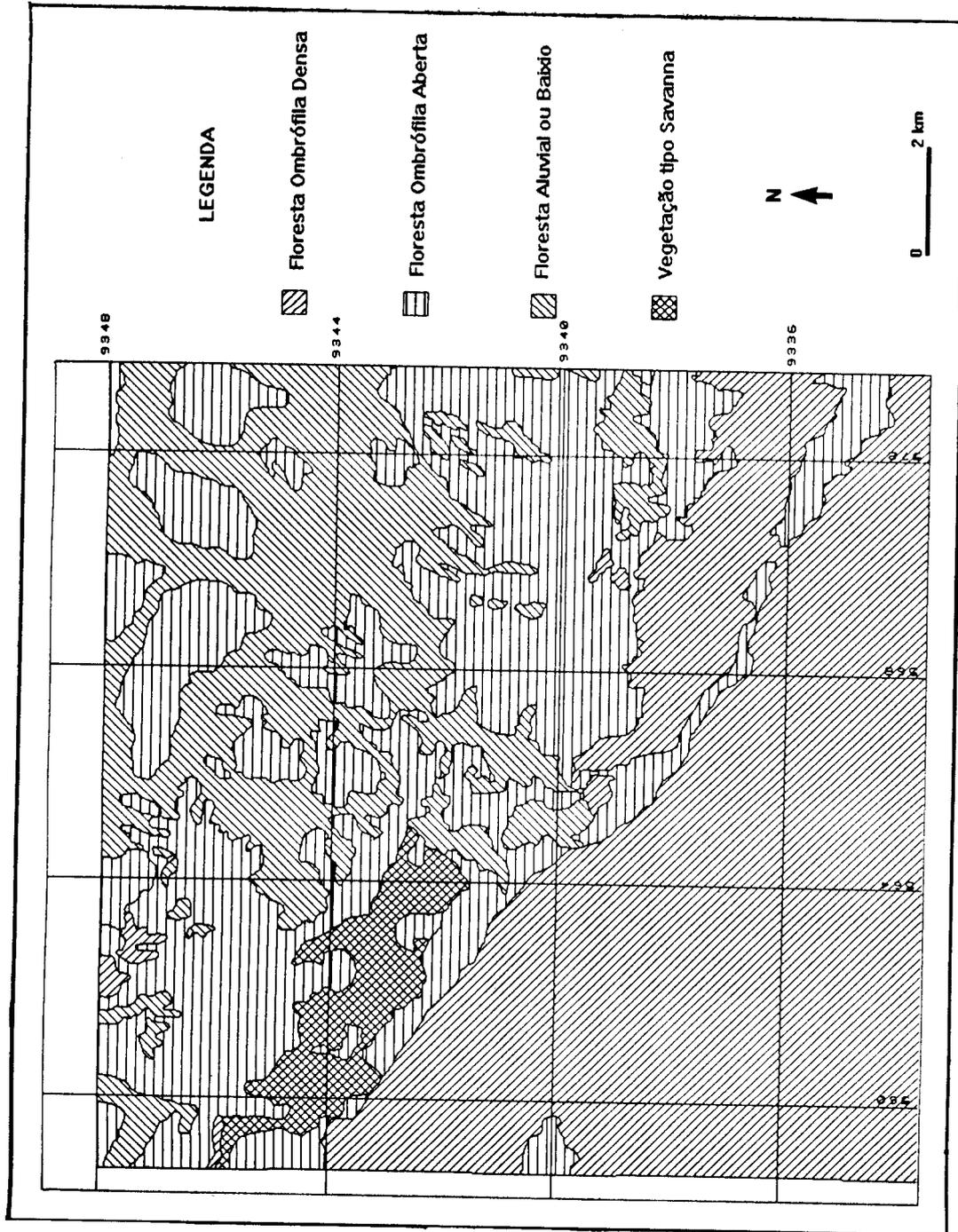


Fig. 5.11 - Grandes classes de vegetação da Área do Pojuca.  
FONTE: Adaptada de Paradella et al. (1994), p. 1641.

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Finalizadas as fases que levaram à realização dessa pesquisa, cujas ferramentas básicas foram os dados aerogamaespectrométricos e TM/Landsat, concluiu-se, de maneira geral, que:

- a transformação de perfis aerogamaespectrométricos em imagens *raster*, onde as propriedades monitoradas por um sistema não-imageador passam a ser expressas agora por níveis de cinza, constitui-se em uma ferramenta valiosa, com vantagens ao uso de mapas de contornos radiométricos e ou perfis geofísicos;
- as imagens gama quando tratadas, através das técnicas de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto orbital, tornam-se mais facilmente interpretáveis, haja vista que, as respostas radiométricas são bem realçadas;
- as imagens gama (canais individuais) apresentaram variações composicionais (altos e baixos radiométricos) intimamente relacionadas aos tipos litológicos. Nestas imagens, as rochas meta-ácidas estão associadas às mais altas respostas radiométricas, enquanto que as metassedimentares e metabásicas localizam-se em locais com baixos níveis radiométricos;
- os melhores produtos para interpretação visual são as composições coloridas, que exibem as concentrações dos radioelementos mediante variações de matizes;
- as imagens gama individuais e combinadas subsidiaram o mapeamento geológico básico na Folha Serra dos Carajás elaborado pela CPRM (1991), quanto: 1) a separabilidade das principais unidades litoestratigráficas; 2) identificação de corpos de natureza ácida (granitos) e 3) exibição de alinhamentos radiométricos. A comparação entre as respostas radiométricas das imagens gama com mapa geológico da CPRM (1991), foi fundamental para as inferências sobre as possíveis ocorrências de determinados tipos ou associações rochosas, em áreas não mapeadas com dados prévios;

- os resultados obtidos nesta pesquisa, mostram que as imagens gama isoladas e, principalmente, combinadas com imagens TM/Landsat são ferramentas que fornecem subsídios valiosos para os mapeamentos geológicos regionais e de semi-detalle. Isto abre perspectivas futuras para uma utilização sistemática dessas fontes de informação, haja vista que o território nacional possui áreas extensas cobertas por levantamentos aerorradiométricos.

Para a **FOLHA SERRA DOS CARAJÁS** concluiu-se que:

- imagens gama individuais, principalmente CT e eTh deram informações que possibilitaram: 1) as separações entre as unidades litoestratigráficas da área, permitindo individualizar dentro do domínio da Fm. Parauapebas, áreas com rochas de filiação ácida e 2) a identificação de alinhamentos radiométricos de direção E-W, NW-SE, que compõem o Cinturão Itacaiúnas;
- imagens gama individuais, bem como a composição colorida RGB demonstraram uma heterogeneidade radiométrica dentro do Granito Serra dos Carajás, que pode estar associada a ocorrência de vários plútons intrusivos ou variação faciológica;
- as imagens eTh e a CT são as melhores para permitir a subdivisão do Gr. Grão Pará, em suas formações Parauapebas, Carajás e Águas Claras (ou Gr. Rio Fresco);

Para a **ÁREA DO POJUCA** concluiu-se que:

- nenhuma das imagens gama individuais possibilitou a separação entre os metassedimentos do Gr. Rio Fresco e as rochas do Igarapé Pojuca;
- para a delimitação do granito Itacaiúnas, do conjunto de imagens gama analisadas, o melhor canal é a imagem razão U/Th.
- o melhor produto colorido, combinando as imagens gama, para separação de litologias e determinação de domínios geofísicos foi a composição colorida dos canais U, Th e CT decorrelacionados;

- o produto final da integração das imagens gama e TM/Landsat, via transformação IHS, foi o melhor para a interpretação visual. Devem ser considerados como pontos fundamentais para tal conclusão: 1) a combinação e a exibição dos atributos espaciais das imagens TM/Landsat e espectrais das imagens gama, em um único produto; 2) a facilidade de manipulação dos parâmetros I, H e S para a obtenção de um produto com cores balanceadas e 3) facilidade na extração de toda informação contida neste produto e melhor precisão na definição dos domínios geofísicos;
- em termos geobotânicos, genericamente, ocorrem associações entre os padrões de respostas radiométricas e as variações da cobertura vegetal, sendo observado que: 1) nos locais com floresta mais densa, as respostas radiométricas tender a ser mais baixas e 2) nos locais com floresta aberta, as respostas radiométricas são mais elevadas, fator que permitiu uma maior variação de matizes nas imagens coloridas;

Trabalhos futuros deverão ser realizados, visando o suporte dessa pesquisa, que se fundamentou em uma coletânea de informações, avaliação de dados e estabelecimento de metodologias para geração e realce de imagens gama, bem como de suas combinações com imagens TM/Landsat. Desta forma, o autor deste trabalho recomenda:

- a integração das imagens gama com dados magnéticos, geoquímicos e, principalmente, imagens de radar do Projeto SAREX e ERS-1. Espera-se que a combinação das imagens gama e radar, apresentem melhores respostas para o mapeamento geológico, haja vista que, a imagem radar fornece uma melhor informação topográfica que as imagens TM/Landsat;
- um estudo quantitativo das principais litologias da área desta pesquisa, através de determinações de seus níveis radiométricos em laboratório e em campo;

- um estudo de semi-detalle ou detalle no Granito Serra dos Carajás, observando suas características petrogenéticas, geoquímicas e radiométricas, objetivando a verificação das possíveis ocorrências de outras fases graníticas ou variações faciológicas. Recomenda-se, ainda neste estudo a integração das imagens gama-geoquímica e gama-radar e TM/Landsat-radar e
- um estudo geoquímico e mineralógico mais detelhado para o granito Itacaiúnas presente na área do Pojuca, visando obter mais informações sobre a variação mineralógica de leste para oeste, deste corpo intrusivo.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aarnisalo, J. Image processing and integration of geophysical, Landsat and other data as a tool for mineral exploration in glaciated precambrian terrain. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, Thematic Conference, 3., Remote Sensing for Exploration Geology, Colorado Springs, CO, Apr. 16-19, 1984. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1984, v.1, p.107-128.
- Aarnisalo, J.; Eeronheimo, J.; Lakanen, E.; Pehkonen, E. On the integrated use of Landsat, geophysical and other data in exploration in the Baltic Shield, Finland. **Photogrammetric Journal of Finland**, 9(1):48-64. Jan. 1982.
- Araújo, O.B.; Maia, R. G. N.; Silva, J. J. X. da; Costa, J. B. S. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: Congresso Latino-Americano de Geologia, 7., Belém, 1988. **Anais**. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, v.1, p.324-338.
- Bailey, R.C. The altitude dependence of terrestrial gamma-ray spectra: a simple model. **Geophysics**, 51(11):2108-2116, Nov. 1986.
- Boaventura, R. S. Geomorfologia. In: **Projeto RADAM. Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, DNPM, 1974, 40p. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- Beisiegel, V. de R.; Bernardelli, A.L.; Drummond, N. F.; Ruff, A. W.; Tremaine, J. W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geologia**, 3(4):215-242, dez. 1973.
- Bristow, Q. Airborne  $\gamma$ -ray spectrometry in uranium exploration. Principles and current practice. In: Clayton, C. G., ed. **Nuclear geophysics**. Harwell, Pergamon, 1983. p.199-229.

Broome, H.J. Generation and interpretation of geophysical images with examples from the Rae Province, Northwestern Canada shield. **Geophysics**, **55(8)**:977-997, Aug. 1990.

Burrough, P. A. **Principles of geographical information systems for land resource assessment**. Oxford, Claredon, 1986. 193p.

Chavez Jr., P. S. **Atmospheric, solar and MTF corrections for ERTS digital imagery**. Phoenix, American Society Photogrammetry, 1975, p.69-79.

Cordani, U. G.; Brito Neves, B.B. The geologic evolution of South America during the archean and early proterozoic. **Revista Brasileira de Geologia**, **12(1-3)**:78-88, mar. 1982.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) **Programa levantamentos geológicos do Brasil. Programa Grande Carajás. Folha SB.22Z-A. Estado do Pará**. Brasília, DNPM/CPRM, 1991. 164p.

Companhia Vale do Rio Doce/ Amazônia Mineração (CVRD/AMZA) Distrito ferrífero da Serra dos Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 26., Belém, 1972. **Resumo das comunicações**. Sociedade Brasileira de Geologia, 1972, p.78-80. (Boletim nº 2).

Crawford, M.F. **The simultaneous use of Landsat and geophysical data in exploration for non-renewable resources**. (Doctor Dissertation) - Stanford University, 1981. 227p.

Cunha, B.C.C. da; Santos, D. B. dos; Prado, P. Contribuição ao estudo da estratigrafia da região dos Gradaus, com ênfase no Grupo Rio Fresco. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., Rio de Janeiro, 1984. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, v.2, p.873-885.

Dall' Agnol, R. **Études sur des granites du type "Rondonia" en Amazonie Orientale et leurs transformations tardi-magmatiques**. (Tese de Mestrado). Univ. Paul Sabatier, 1980. 348p.

- Dall' Agnol, R. Os granitos anorogênicos da Amazônia brasileira. Suas analogias com os "younger granites" do oeste da África. In: Congresso Latino-Americano de Geologia, 4., 1982. **Anais**. Buenos Aires, v.2, 1986, p.113-131
- Dickson, B.H.; Bailey, R.C.; Grasty, R.L. Utilizing multichannel airborne gamma-ray spectra. **Canadian Journal Earth Sciences**, 18(12):1793-1801. Dec. 1981.
- Drury, S.A.; Walker, A.S.D. Display and enhancement of gridded aeromagnetic data of the Solway Basin. **International Journal of Remote Sensing**, 8(10):1433-1444, Out. 1987.
- Dutra, L. V.; Meneses, P. R. Aplicação da transformação IHS para realce de cores em imagens Landsat. In: Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, 4., 10-15 ago., 1986. **Anais**. Gramado, SELPER, v.1, 1986, p.675-680.
- \_\_\_\_\_ **Realce de cores em imagens de sensoriamento remoto utilizando rotação de matiz no espaço IHS**. São José dos Campos, INPE, 1987. 13 p. (INPE - 4207 - PRE/1088).
- \_\_\_\_\_ **Realce visual de imagens coloridas digitais utilizando-se de transformação no espaço de cores IHS (Transformação IHS)**. São José dos Campos, INPE, 1988. 13 p. (INPE - 4482 - PRE/1248).
- Duval, J.S. Radioactivity method. **Geophysics**, 45(11):1690-1694, Nov. 1980.
- \_\_\_\_\_ Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data. **Geophysics**, 48(6):722-735, June, 1983.
- Eliason, P.T.; Donovan, T.J.; Chavez Jr., P.S. Integration of geologic, geochemical, and geophysical data of the Cement oil field, Oklahoma, using spatial array processing. **Geophysics**, 48(10):1305-1317, Out. 1983.

- Felgueiras, C. A.; Câmara, G. Sistema de informações geográficas do INPE. In: Assad, E. D.; Sano, E. E., ed. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1993. p.41-59.
- Ferreira, F.J.F. **Aerogamaespectrometria e aeromagnetometria de um trato ocidental do pré-cambriano paulista**. (Tese de Doutorado) - USP, São Paulo, 1991. 151p.
- Galbraith, J.H.; Saunders, D.F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. **Journal of Geochemical Exploration**, **18**:49-73, 1983.
- Grasty, R.L. Uranium measurement by airborne gamma-ray spectrometry. **Geophysics**, **40**(3):503-519, June 1975.
- Grasty, R.L.; Glynn, J.E.; Grant, J.A. The analysis of multichannel airborne gamma-ray spectra. **Geophysics**, **50**(12):2611-2620, Dec. 1985.
- Harris, J.R. Mapping of regional structure os Eastern Nova Scotia using remotely sensed imagery: implications for regional tectonics and gold exploration. **Canadian Journal of Remote Sensing**, **17**(20):122-136, Apr. 1991.
- Harris, J.R.; Murray, R. IHS transform for the integration of radar imagery with geophysical data. In: IGARSS'89; Canadian Symposium on Remote Sensig, 12., Vancouver, July 10-14, 1989. **Proceedings**. Canada, IEEE, 1989, v.2, p.923-926.
- Harris, J.R.; Murray, R.; Hirose, T. IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **56**(12):1631-1641, Dec. 1990.
- Hirata, W.K. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 1., Belém, maio, 1982. **Anais**. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, 1982, Anexo, p.13-18.

- Hirata, W.K.; Rigon, J.C.; Kadekaru, K.; Cordeiro, A. A. C.; Meireles, E. de M.  
Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, 1982. **Anais**. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, 1982. v.1, p.100-110.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) **Gamma-ray surveys in uranium exploration**. Viena, IAEA, 1979. 90 p. (Technical Reports Series No. 186).
- Kaplan, I. **Nuclear radiation**. New York, NY, Addison-Wesley, 1963. 770p.
- Knoll, G.F. **Radiation detection and measurement**. New York, NY, John Wiley, 1979. 816 p.
- Kogan, R.M.; Nazarov, S.J.; Fridman, Sh.D. **Gamma spectrometry of natural environment and formation**. Jeruzalem, IPST, 1971. 337 p.
- Kowalik, W.S.; Glenn, W.E. Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation. **Geophysics**, 52(7):875-884, July, 1987.
- Lapp, R.E.; Andrews, H.L. **Nuclear radiation physics**. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1963. 413p.
- Macambira, J.B.; Ramos, J.F.F.; Assis, J.F.P.; Figueiras, A.J.M. **Projetos Serra Norte e Pojuca: relatório final**. Belém, MME, UFPA, Depto. de Geologia, 1990. 149p.
- Marinho, F.A.V.; Azevedo, M.L.V. de Interpretação geológica dos dados aeromagnéticos e aeroradiométricos - Área Carajás - Folha SB.22-Z-A-II. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34., Goiânia, out. 1986. **Anais**. Goiânia, Sociedade Brasileira de Geologia, 1986, v.6, p.2467-2479.
- Matolín, M. Radiometric methods and methods of nuclear geophysics. In: Stanislav, M. et al., ed. **Introduction to applied geophysics**. Dordrecht, D.Riedel, 1984. p.154-231.

- Meireles, E. de M.; Hirata, W. K.; Amaral, A. F.; Medeiros Filho, C. A.; Gato, W. C..  
Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, Estado do  
Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., Rio de Janeiro, 1984. **Anais**. Rio  
de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, v.5, p.2164-2174.
- Meneses, P. R.; Assad, E. D.; Sano, E. E. **Introdução ao processamento de imagens  
digitais de satélites de sensoriamento remoto**. Brasília, Universidade de Brasília,  
1991. 96 p.
- McDonald, A.J.W. The use and abuse of image analysis in geophysical potential field  
interpretation. **Surveys in Geophysics**, 12(6):531-551, Nov. 1991.
- McInnis, T.R.; Akhavi, M.S. Integration of radiometric and Landsat digital data for  
geologic investigation and exploration, Guysborough area, Nova Scotia. In:  
Canadian Symposium on Remote Sensing, 10., Edmonton, AB, May 5-8, 1986.  
**Proceedings**. Edmonton, AB, M. Diane Thompson & Ronald J. Brown, 1986, v.1,  
p.11-17.
- Minty, B.R.S. Airborne gamma-ray spectrometric background estimation using full  
spectrum analysis. **Geophysics**, 57(2):279-287, Feb. 1992.
- Nordemann, D.J.R.; Pereira, E.B. **Elementos básicos de geofísica nuclear**. São José  
dos Campos, INPE, 1984. 28 p. (INPE - 3002 - PRE/452).
- Northway Survey Cooperation Limited (NSCL) **Report to the DNPM MME, Brasil  
on the general magnetic and radiometric survey of the Projeto Geofísico Brasil-  
Canadá**. Rio de Janeiro, DNPM, 1979.
- Paradella, W.R.; Kushigbor, C.A.; Fabbri, A.G. Um banco de dados digitais para  
exploração na faixa mineralizada em Cu-Zn do Pojuca (Carajás), baseado em dados  
geológicos, geoquímicos, de sensores remotos e de elevação. In: Simpósio Brasileiro  
de Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 24-29 jun, 1990. **Anais**. São José dos  
Campos, INPE, 1990, v.3, p.649-662.

- Paradella, W.R.; Silva, M.F.F. da; Rosa, N.A.; Kushigbor, C.A. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of Carajas Mineral Province (Amazon Region, Brazil) based on digital TM/Landsat and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**, **15**(8):1633-1648, 1994.
- Pereira, E.B.; Nordemann, D.J.R. The effects of a tropical rain forest cover on airborne gamma-ray spectrometry. **Revista Brasileira de Geofísica**, **1**(2):99-108, mar. 1983.
- Pitkin, J.A.; Duval, J.S. Design parameters for aerial gamma-ray surveys. **Geophysics**, **45**(9):1427-1439, Sept. 1980.
- Price, W.J. **Nuclear radiation detection**. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1964. 430p.
- PROJETO RADAMBRASIL **Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, DNPM, 1974, 170p. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- Reeves, C.V. Airborne geophysics for geological mapping and regional exploration. **ITC Journal**, (3):147-161, Nov. 1985.
- Rejl, J.; Saic, S.; Dedacek, K. Processing of aerogeophysical data by PERICOLOR image processing system. **Surveys in Geophysics**, **12**(11):507-514, Nov. 1991.
- Rio Doce Geologia e Mineração (DOCEGEO) **Relatório final da pesquisa do projeto cobre Carajás-Pojuca**. Belém, Rio Doce Geologia e Mineração S.A.). 1984.
- \_\_\_\_\_ Lithostratigraph review of the Crajás District and southern Pará-Brazil. In: IUGS. Precambrian evolution of the Amazon region, Carajás, 1987. Final meeting of the working group. **Extend abstract**. Carajás, DOCEGEO, 1987, p.11-19.
- \_\_\_\_\_ Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém, 1988. **Anais**. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, 1988, p.11-54.

- Rolim, S.B.A. **Avaliação do uso da transformação IHS na integração de dados geofísicos (aeromagnetometria) e de sensoriamento remoto (TM-Landsat) para a investigação geológica na área do Pojuca (Serra dos Carajás, PA).** (Dissertação de Mestrado). INPE, São José dos Campos, dec 1993. 119p. (INPE - 5532 - TDI/521)
- Santos, B. A. dos. **Amazônia: potencial mineral e perspectivas de desenvolvimento.** São Paulo, T. A. Queiroz, 1983. 256 p.
- Schetselaar, E.M.; van Dijk, P.M.; Al Fasatwi, Y.A. Digital image processing of geophysical data using a raster based GIS. **ITC Journal**, (3):248-252. 1990.
- Schuch, L.A.; Nordemann, D.J.R. **Espectrometria gama e medidas de baixas atividades nucleares.** INPE, São José dos Campos, 1991. 86 p. (INPE - 5265 - PUD/047).
- Shupe, S.M.; Akhavi, M.S. Integration of remotely sensed and GIS data for mineral exploration: Halifax pluton area, Nova Scotia, Canada. **Geocarto International**, 4(3):49-54, Sept. 1989.
- Silva, G.G.; Lima, M. I. C.; Andrade, A. R. F.; Issler, R. S.; Guimarães, G. Geologia. In: **Projeto RADAM. Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, DNPM, 1974. (Levantamento de Recursos Naturais, 4), 170 p.
- Siqueira, J.B. **Evolução litoestrutural do duplex distensivo do Salobo.** (Dissertação de Mestrado) - Belém, UFPA, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, 1990.
- Tassinari, C.C.G. et al. Geological evolution and evaluation of recent geochronological data in Amazonian craton. In: IUGS. Precambrian evolution of the Amazon region, Carajás, 1987. Final meeting of the working group. **Extend abstract.** Carajás, DOCEGEO, 1987, p.20-31.
- Vasconcelos, R. M.; Metelo, M. J.; Motta, A. C.; Gomes, R. D. **Geofísica para levantamentos geológicos.** Rio de Janeiro, 1994.

Veloso, H.P.; Japiassu, A. M. S.; Goes Filho, L.; Leite, P.F. Vegetação. In: **Projeto RADAM. Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, DNPM, 1974, 119 p. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).

Veneziani, P.; Paradella, W.R.; Santos, A. R.; Bignelli, P.A.; Dias, R.R.; Singhroy, V. H. O experimento SAREX na Amazônia: resultados preliminares na área N<sub>1</sub>/Azul/Pojuca. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4., Belém, 28 maio - 03 junho, 1994. **Resumos expandidos.** Belém, Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Norte, 1994, 394-395.



**APÊNDICE A**  
**GRANDEZAS FÍSICAS**



As grandezas físicas, como mencionado anteriormente na secção 3.1.2, serão aqui definidas baseado em Knoll (1979).

**Atividade** - a atividade de um material radioativo, refere-se ao número de desintegrações ou emissões por unidade de tempo;

**Atividade específica** - a atividade específica de um material radioativo, é o número de desintegrações por unidade de tempo e por unidade de massa de amostra;

**Exposição radioativa** - é a intensidade de radiação de um determinado local, medida pela sua capacidade de produzir íons com carga total igual a 1 coulomb, para cada quilograma de massa de ar considerada;

**Taxa de exposição** - é a intensidade de radiação de um determinado local, medida pela sua capacidade de produzir íons portadores de eletricidade igual a 1 ampere, para cada quilograma de massa de ar considerada;

**Dose de energia** - é a energia produzida por uma radiação eletromagnética ou corpuscular por quilograma de massa do material radioativo;

**Emissão da fonte** - número de partículas emitidas por unidade de tempo;

**Fluxo de partículas** - fluxo de partículas, em regime permanente que atravessa uma secção transversal de 1 m<sup>2</sup>.

A energia da radiação apresenta como unidade o elétron-volt, que é definido como a energia ganha por um elétron quando ele é submetido a uma diferença de potencial de um volt. Essa unidade como mencionado na secção 3.1.2, tem múltiplos como o o quiloelétron-volt (keV), o megaelétron-volt (MeV) e o gigaelétron-volt (GeV). Esta unidade apresenta a seguinte relação com a unidade joule (J) do Sistema Internacional (SI):

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$