



Fotointerpretação geológica em imagens Landsat 5/TM para o estudo dos controles estruturais no alojamento dos maciços graníticos do norte de Roraima

S.S. Tavares Jr.¹ & P. Veneziani² (in memoriam)

1 Universidade Federal de Roraima – UFRR, av. Ene Garcez, 2413 Boa Vista – RR, stélio@dgl.ufrr.br

2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos – SP

Abstract The northern region of the Roraima state has as characteristic a surface covered of sparse bush vegetation with a relief that varies from flat, slightly wavy to mountainous in the eastern sector while in the western sector predominates a rougher relief and a vegetation of dense forest. Similar to other remote Brazilian Amazonian regions there are few geological studies and systematized mapping. This work aims at interpretation of remote sensing images (Landsat-5/TM), with the goal of contributing to the geological mapping of this region, with emphasis to the structural regional control. Remote sensing images were submitted to all the stages of pre-processing, with a highlight for the geometrical correction through orthorectification method. The photointerpretation analysis employed on the remote sensing images, plus the field data allowed the interpretation of the main lithological and structural of the area. The E – W, WNW – ESE (\pm N70W), NE SW and NNE SSW (N20 30E) directions are the most common trends observed in this area, by the application of remote sensing techniques. The study of the relationship between these structural directions enabled the characterization of a regime predominantly ductile, ductile – brittle and brittle transpressive with local transtensive components. Associated to these efforts occurred the emplacement of granitic massives related to the releasing bends structures in ductile and rhombo-chasms.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, Landsat 5/TM, fotointerpretação geológica, alojamento de granitos e norte de Roraima.

INTRODUÇÃO Na Amazônia, várias das ocorrências minerais economicamente viáveis estão associadas a ambientes vulcânicos e a processos de ascensão e alojamento de maciços graníticos ao longo de zonas de cisalhamento transcorrentes, conseqüentemente análises dessas associações requerem estudos tectônicos apurados, desde levantamentos básicos até a modelagem. Particularmente, o norte de Roraima constitui-se uma das regiões da Amazônia, onde essas zonas de cisalhamento são tectonicamente pouco conhecidas. Apesar disso, pesquisas preliminares indicaram importantes registros de acumulações minerais relacionadas a esses ambientes geológicos.

Entre esses trabalhos anteriores destacam-se o Projeto RADAMBRASIL (Montalvão *et al.* 1975), na escala 1:1.000.000, e os mapeamentos regionais do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil executados pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) superintendência de Manaus, nas escalas 1:1.000.000 e 1:500.000, que incluem os projetos Molibdênio (Melo *et al.* 1978) e Caburaí (Pinheiro *et al.* 1990) e mais recentemente Roraima Central (CPRM 1998). Além desses, importantes pesquisas foram publicadas na forma de teses de doutorado (Carvalho 1997, Costa 1999, Tavares Jr. 2004).

Dentro desse contexto, este trabalho apresenta os primeiros resultados da aplicação de técnicas de

sensoriamento remoto, incluindo processamento de imagens digitais e análises fotointerpretativas, como meios auxiliares às investigações geológicas, em especial aquelas direcionadas às implicações tectono-estruturais no alojamento de maciços graníticos aflorantes em uma porção integrante da região norte do estado de Roraima, representativa de sua constituição geológica e portadora de uma disponibilidade satisfatória de dados de sensoriamento remoto e geológicos. Em síntese esses estudos visam subsidiar futuras pesquisas de aproveitamento dos recursos minerais dessa região.

CONTEXTO GEOLÓGICO A área de estudo situa-se na porção centro – norte do estado de Roraima, mais precisamente entre os meridianos de 60°35'14'' W e 61°48'36'' W e os paralelos de 03°41'16'' N e 04°33'31'' N. O principal acesso terrestre é feito pela rodovia federal BR-174, que atravessa toda extensão da área em uma direção aproximada N-S (Fig.1).

O território do estado de Roraima é parte integrante da porção norte do Cráton Amazônico, no sentido empregado como sinônimo de Plataforma Amazônica (Almeida *et al.* 1978). A evolução dessa unidade geotectônica, conforme esse autor, Amaral, (1984) e Lima (1984), iniciou-se a partir de núcleos arqueanos, com retrabalhamentos e remobilizações durante o Ciclo Transamazônico, tendo se estabilizado em períodos mesoproterozóicos. Porém, no decorrer



de sua evolução experimentou dois importantes eventos de reativação plataformar, retratados pelo amplo desenvolvimento de associações vulcano – plutônicas e seqüências sedimentares de plataforma.

Nessa parte do território roraimense aflora uma vasta variedade de tipos litológicos que abrange quase todo o espectro cronogeológico, desde unidades paleoproterozóicas até épocas holocênicas. Para a designação das unidades litológicas representativas desses litotipos seguiu-se a nomenclatura adotada pela CPRM (1998).

O conjunto das rochas dessa parte do Cráton Amazônico, considerado pela maioria dos autores como os termos paleoproterozóicos mais antigos, apresenta associações típicas de seqüências vulcano-sedimentares de baixo a médio grau metamórfico, tais como paragneisses, anfíbolitos, xistos, quartzitos, formações ferríferas bandadas, metacherts e metavulcânicas, inseridos no Grupo Cauarane. Associa-se ainda a esse embasamento uma série de corpos granitóides representantes de um magmatismo de caráter cálcio-alcalino, reunidos na Suíte Intrusiva Pedra Pintada.

Ainda na Era Paleoproterozóica registra-se um extenso magmatismo vulcano-plutônico de caráter ácido a intermediário, constituído por riolitos, riodacitos, dacitos, andesitos, rochas piroclásticas, granitos de composições variadas, granodioritos e granófiros. Em especial na região norte e nordeste de Roraima essas rochas se expõem de forma contínua, com os termos vulcânicos reunidos no Grupo Surumu, enquanto que os plutônicos na Suíte Intrusiva Saracura.

Ao término do episódio magmático vulcano-plutônico, diversas e extensas áreas subsidentes do Cráton Amazônico foram palco de expressivos processos de sedimentação paleoproterozóica. Em especial na parte mais setentrional desse cráton, esses sedimentos distribuem-se de forma contínua e descontínua em várias áreas da porção norte do território brasileiro e em países vizinhos como Venezuela, Guiana e Suriname. No entanto, situa-se no setor mais norte de Roraima a mais extensa área contínua de exposição dessa cobertura sedimentar, designada por Supergrupo Roraima.

O termo Magmatismo Avanavero foi adotado para designar todos os sills básicos intercalados no Supergrupo Roraima e diques relacionados a esses sills, principalmente aqueles orientados na direção WNW - ESE.

O final do Mesoproterozóico foi marcado pelo aparecimento de zonas de cisalhamento transcorrentes desenvolvidas durante o Episódio K'Mudku, correlacionado ao Episódio Metamórfico Nickerie no Suriname e na República Cooperativista das Guianas

(Priem *et al.* 1971). Esse evento foi o responsável pela formação de faixas de rochas miloníticas e cataclásticas. Segundo CPRM (1998) o Episódio K'Mudku afetou todas as unidades proterozóicas.

Uma extensa sedimentação cenozóica constituída por tipos arenosos e argilosos parcialmente laterizados recobre o extremo sudeste da área. Esses sedimentos são agrupados na Formação Boa Vista. Depósitos holocênicos compreendendo aluviões e terraços distribuem-se de forma irregular e discordante sobre os sedimentos cenozóicos mais antigos. Costa (1999) destaca a grande importância econômica dos depósitos aluvionares adjacente ao Supergrupo Roraima, em virtude de seus conteúdos em diamante e ouro.

MATERIAIS E MÉTODOS Para o completo recobrimento da área de estudo com as imagens do Landsat 5/TM foi necessário a preparação de um mosaico, a partir do par de cenas 232/57 e 233/57, adquiridas em 17/02/90 e 11/02/91, respectivamente. Ressalta-se que as referidas cenas foram adquiridas em épocas de mesma estação, a fim de se alcançar às condições mais próximas da geometria de aquisição (azimute de iluminação e ângulo de elevação solar). Todos os procedimentos do processamento das imagens digitais foram realizados no Laboratório de Geoprocessamento do Núcleo de Pesquisas em Recursos Naturais (NUREN) da Universidade Federal de Roraima (UFRR), com o uso do aplicativo PCI Geomatics, v.9.1.7.

No processamento das imagens Landsat, inicialmente, foram aplicadas operações de atenuação da interferência atmosférica e correção geométrica por meio da técnica de ortorretificação. A técnica empregada baseou-se na metodologia desenvolvida por Toutin & Carbonneau (1992). Desse modo foram coletadas, regularmente em toda a área, informações referentes à posição geográfica e altimetria de 19 pontos de controle, tanto por meio de GPS, durante os trabalhos de campo, como a partir de cartas topográficas na escala 1:100.000. Em seguida, utilizando-se ainda, os dados orbitais relativos ao sistema sensor e ao modelo da Terra obteve-se o modelo matemático requerido, que juntamente com o Modelo de Elevação Digital formam os parâmetros básicos para o processo de ortorretificação. Nesse processo foi alcançado valor de RMS (erros médios quadráticos) de 23,49 m para a cena 232/57 e de 29,18 m para a 233/57, ou seja, bem próximo da resolução espacial nominal do TM (30 m). A reamostragem foi realizada pelo interpolador por convolução cúbica.

A aplicação de operações relativas ao realce consistiu, inicialmente, na obtenção das bandas com menor grau de correlação (Chavez *et al.* 1982). Para a cena 232/57 as bandas TM2, TM4 e TM5

apresentaram o maior OIF (*Optimum Index Factor*), enquanto que para a 233/57 o maior valor pertenceu ao triplete TM3, TM4 e TM5. Porém para a confecção do mosaico foi escolhido o primeiro triplete, em função da cena 232/57 cobrir mais de 80% da área e pelo fato do valor do OIF desse triplete (TM2, TM4 e TM5) na cena 233/57 constituir-se um dos mais elevados. A composição da imagem colorida R(5)G(4)B(2) seguiu a ordem decrescente da variância entre as bandas dos tripletes (Fig. 2).

Técnicas de correção radiométrica, como os métodos de calibração relativa ou retificação radiométrica, seriam operações necessárias, prévias à confecção do mosaico, caso os objetivos do estudo necessitassem de caracterizações espectrais mais precisas. Essas técnicas tendem a transformar os dados radiométricos obtidos em diferentes datas e sob diferentes condições de aquisição em um conjunto de dados comparáveis em termos de suas propriedades intrínsecas (Shimabukuro *et al.* 1998). No entanto, como a principal utilização das imagens TM neste trabalho foi direcionada para fotointerpretação geológica, preferiu-se aplicar apenas a equalização do contraste por meio da manipulação dos histogramas das imagens, a fim de reduzir as eventuais variações de tonalidade entre os pares mosaicados.

Os procedimentos aplicados para a fotointerpretação geológica seguiram as metodologias desenvolvidas por Veneziani & Anjos (1982) para dados ópticos. De uma forma geral esses procedimentos podem ser divididos em três etapas distintas: a primeira refere-se à resolução entre uma análise mono ou estereoscópica; a segunda consiste na definição das características dos dados ópticos (tipo de sistema – imageador ou câmara fotográfica, ângulos de elevação, azimuth solar e resoluções espectral, espacial e temporal) e a última, compreende a associação de um significado geológico aos elementos de imagem e de suas relações.

O primeiro passo seguido na etapa de interpretação geológica consiste no reconhecimento na imagem dos elementos naturais da paisagem (drenagem e relevo). Esses desempenham papel fundamental no desenho da paisagem natural da superfície terrestre, bem como suas disposições refletem a organização estrutural da crosta (Fig. 3). Além das feições de drenagem e relevo, a tonalidade consiste em uma outra propriedade das imagens de sensoriamento remoto que deve ser considerada, pois está diretamente condicionada a reflectância dos alvos superficiais, no caso de imagens ópticas.

O passo seguinte trata do exame cuidadoso do padrão de organização das feições texturais de drenagem e relevo (Fig.4), a partir da análise da frequência textural, da estrutura e do grau e ordem de

estruturação, os quais compõem o conjunto das propriedades das formas. A definição dessas propriedades depende de um estudo prévio das características desses elementos texturais, representadas pela frequência, feições lineares, alinhamentos, tropia, assimetria e homogeneidade, no caso das feições texturais de drenagem e relevo. Para o caso das feições de relevo considera-se ainda a forma das vertentes e as quebras positivas e negativas de relevo.

A partir desse exame individualizam-se na imagem vários setores com propriedades de textura e estrutura similares, os quais constituem as zonas homólogas. Na maioria das vezes, os limites entre essas zonas correspondem a uma passagem gradual ou difusa das propriedades dos elementos texturais. Porém, há casos de limites bem definidos, por exemplo, quando esses são marcados por uma quebra negativa de relevo ou por um alinhamento de drenagem.

Caracterizadas as diversas formas de arranjo dos elementos texturais de drenagem e relevo juntamente com o exame da variação tonal, é possível avaliar os significados geológicos (Fig. 5), bem como definir unidades fotolitológicas e associá-las as litologias descritas na literatura, ou verificadas no nível de afloramentos.

A implementação desses procedimentos em um estudo de fotointerpretação geológica independe do tipo de análise, se monoscópica ou estereoscópica. Na verdade, dependendo da disponibilidade dos dados de sensores remotos, sugere-se a adoção harmoniosa dos dois tipos de análise.

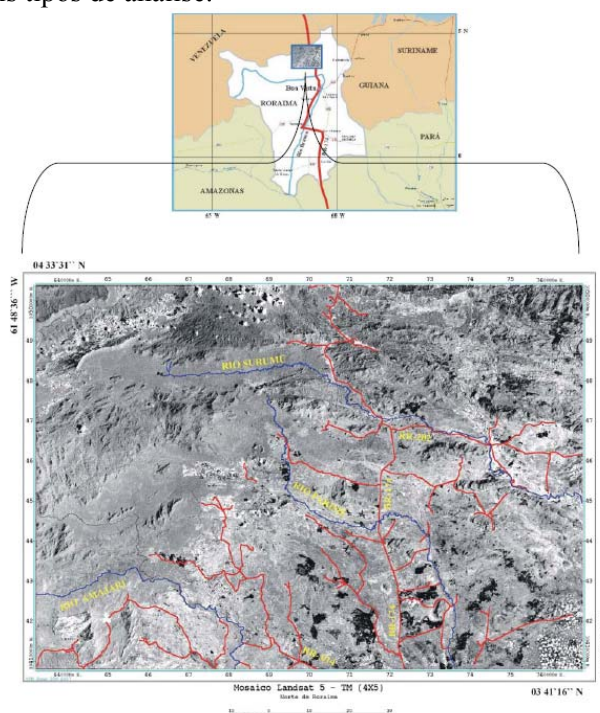


Figura 1. Localização da área de estudo

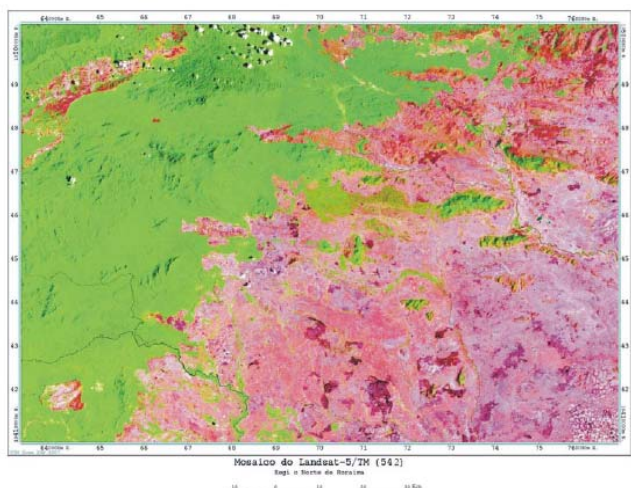


Figura 2. Imagem do mosaico, composto por partes das cenas Landsat 5/TM de órbita/ponto 232/57 e 233/57 de 17/02/90 e 11/10/92 respectivamente, na composição colorida R(5)G(4)B(2), resultante do cálculo do OIF

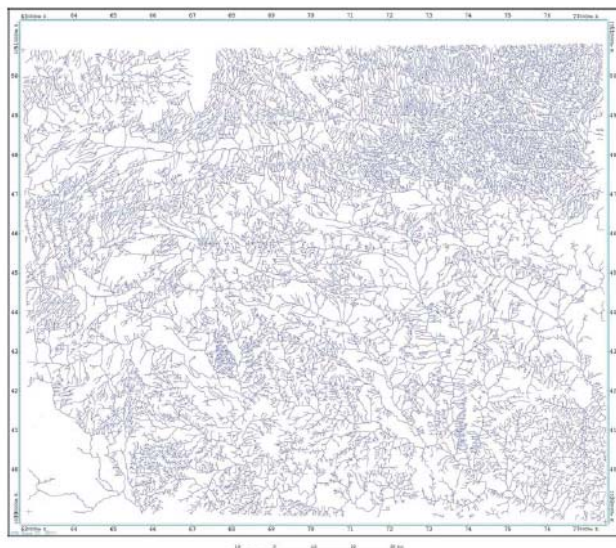


Figura 3. Mapa da rede de drenagem elaborado a partir da fotointerpretação da imagem mosaico nas bandas TM3, TM4 e TM5

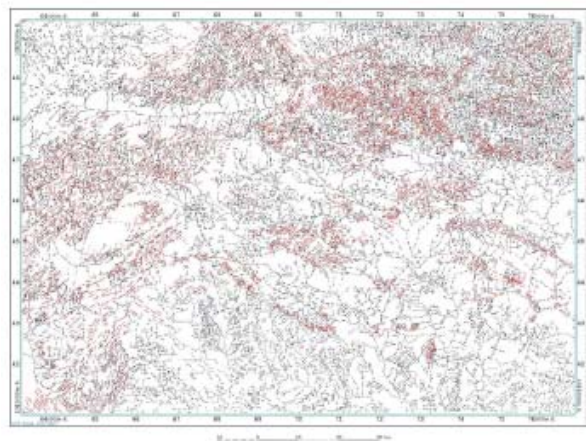


Figura 4. Mapa das feições lineares de drenagem (em preto) e de relevo (em vermelho)

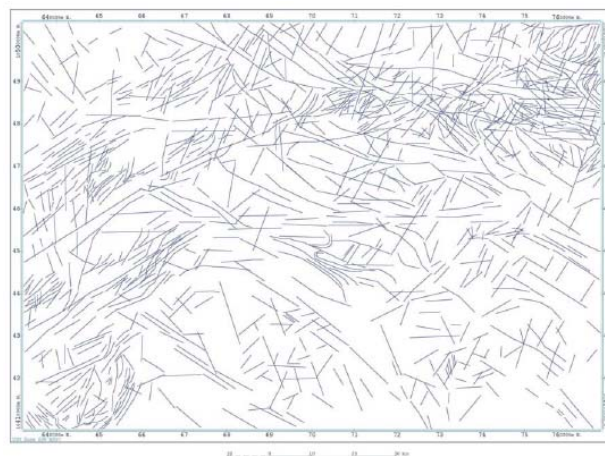


Figura 5. Mapa de lineamentos interpretados a partir dos alinhamentos das feições lineares de drenagem e relevo

IMPLICAÇÕES TECTONO – ESTRUTURAIS NO ALOJAMENTO DOS MACIÇOS GRANÍTICOS

Os maciços graníticos estudados estão inseridos na Suíte Intrusiva Saracura (SIS). Essas rochas distribuem-se por toda a faixa leste da área, onde sustentam um relevo montanhoso e formas menores como morros e colinas, cujas altitudes variam em torno de 250 a 1200 m. Os mais conhecidos correspondem às serras do Mel, Marari e Saracura. Em grande parte dessas serras predomina uma vegetação densa com árvores de médio porte, contrastando com a região de Savana e relevo mais aplainado adjacente.

A fotointerpretação sobre as imagens de sensoriamento remoto e os dados de campo permitiu reconhecer uma estruturação característica nesses corpos graníticos, onde nas partes centrais predominam estruturas essencialmente rúpteis, constituídas por sistemas de fraturamentos correspondentes ao Proterozóico e ou às reativações referentes às eras Meso e Cenozóicas. Nas áreas de bordas (regiões de contato) verificou-se a ocorrência de estruturas dúcteis e rúpteis de direções preferenciais E-W, N70W e N30-50E, representadas por zonas de cisalhamento transcorrentes (ZCTs) dúcteis e rúpteis (falhas transcorrentes), rampas obliquas e fraturas preenchidas por veios de quartzo. Ao longo das ZCTs desenvolveram-se planos de foliações miloníticas – cataclásticas ou miloníticas subverticalizados, que por vezes exibem um padrão anastomosado.

As disposições geométricas, a natureza e as direções estruturais interpretadas no campo e nas imagens orbitais refletem claramente o controle estrutural das bandas e ZCTs exercido no processo de alojamento dos maciços graníticos da SIS, desde os níveis crustais mais profundos (*releasing bend*) até os

mais superiores (rhombic chasm). No que diz respeito ao granito da Serra Saracura, a orientação das feições lineares multidirecional ordenada, discordante com a das circunvizinhanças, e a forma subcircular caracterizam uma colocação em períodos tardi a pós-tectônicos. As estruturas interpretadas nos mapas evidenciam esse controle (Figs. 6 e 7).

No caso do granito da Serra Marari, observa-se no mapa das figuras mencionadas anteriormente que os limites/contatos e a configuração geométrica são definidos pelas direções estruturais E-W, WNW-ESE e NW-SE, cujas feições de arrasto indicam movimentação sinistral. Essas feições juntamente com as foliações de médio ângulo desenvolvidas nas encaixantes a SE do granito sugerem a formação de rampas oblíquas. Nas regiões dessas feições esforços transtensivos podem promover a formação de aberturas entre os planos de cisalhamento, de modo a fornecer espaço crustal suficiente para acomodar o magma granítico. Em níveis crustais profundos esses espaços estão relacionados às feições tipo *releasing bends* (Fig. 7).

O maciço da Serra do Mel também apresenta limites/contatos e sua disposição espacial controladas pelas linhas estruturais, porém nesse caso os controles foram exercidos pelas direções estruturais $\pm N70W$ e $\pm N50E$, correspondente à direção trativa, comprovando a relação do mecanismo de alojamento desse corpo aos esforços extensionais tipo rhombic chasm (Fig. 7).

Os corpos graníticos das serras Alemanha e Orocaima, esse último relacionado aos termos finais da Suíte Intrusiva Pedra Pintada, apresentam claramente suas configurações geométricas alongadas e concordantes com as zonas de cisalhamento E-W, WNW-ESE e NW-SE. Essa configuração aliada às feições estruturais concordantes no interior desses corpos são fortes indicativos de uma colocação ao longo de aberturas promovidas pelos deslocamentos dessas zonas de cisalhamento. Nessas circunstâncias o alojamento ocorre nas direções sintéticas ao movimento da zona principal, como no caso do granito da Serra Alemanha (Fig. 7).

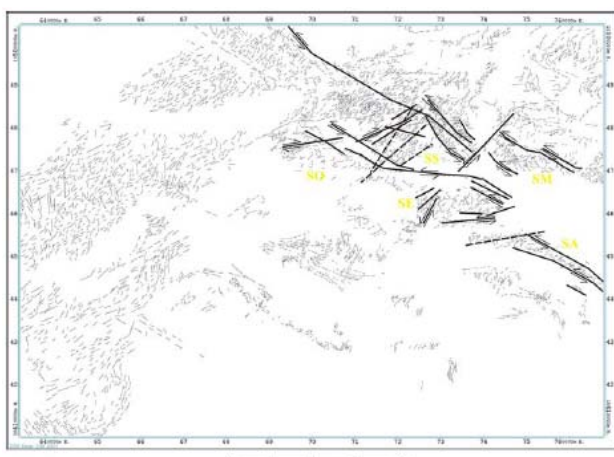


Figura 6

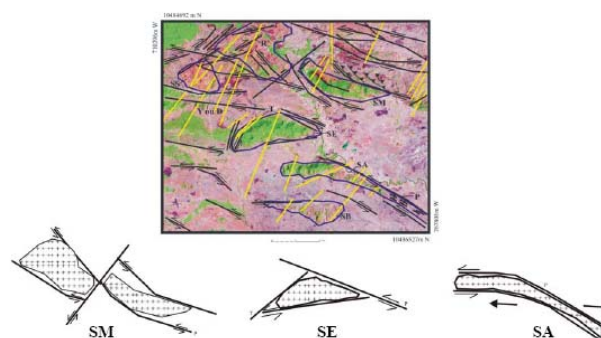


Figura 7

Figuras 6 e 7. Zonas de cisalhamento transcorrentes e oblíquas sinistrais, interpretadas a partir do alinhamento de feições lineares de relevo, as quais controlaram o alojamento de corpos graníticos da SIS, como os da Serra Marari (SM), Serra Alemanha (SA) e Serra do Mel (SE). No granito Saracura (SS), o arranjo discordante dessas feições em relação ao das áreas entorno, além da ocorrência de estruturas rúpteis, que juntamente com as ZCT limitam o corpo de forma romboédrica. Destaca-se ainda o esquema dos modos de alojamento de alguns granitos da SIS condicionados as zonas de cisalhamento em estruturas tipo releasing bends (SM), a áreas extensionais (SE) e a áreas dilatacionais criadas pelos dobramentos das zonas de cisalhamento (SA)

CONSIDERAÇÕES FINAIS As análises empregadas sobre as imagens de sensoriamento remoto, aliadas aos dados de campo permitiram a obtenção de importantes contribuições tanto na caracterização litológica como estrutural.

Com relação à caracterização estrutural, importantes direções estruturais foram interpretadas,

entre essas, destacam-se as direções E-W, WNW-ESE ($N70W$), NE-SW, NW-SE e NNE-SSW ($N20-30E$), correspondentes às zonas de cisalhamento transcorrentes, rampas oblíquas, falhas transcorrentes, estruturas planares como foliações miloníticas – cataclásticas e estruturas rúpteis relacionadas às falhas normais e juntas. As análises dos relacionamentos



entre essas estruturas possibilitaram a interpretação de um regime tectônico predominantemente transpressivo de natureza dúctil, dúctil – rúptil e rúptil com esforços transtensivos localizados.

Os esforços transtensivos foram responsáveis pelos alojamentos de grande parte dos maciços graníticos, principalmente os da SIS, associados às estruturas tipo releasing bends em níveis crustais profundos (natureza

dúctil), e às estruturas romboédrica tipo rhombo – chasms em níveis crustais rasos (natureza rúptil).

Esse controle estrutural e a forte correlação entre áreas de alteração hidrotermal, com as de ocorrências dos maciços graníticos indicam a possibilidade de acumulações de fluidos mineralizantes, que geralmente acompanham as intrusões desses corpos.

Referências

- ALMEIDA F.F.M. de. 1978. A evolução dos crátons Amazônico e do São Francisco, comparada com a de seus homólogos do Hemisfério Norte. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, *Anais*, p.2393-2407.
- AMARAL G. 1984. Províncias Tapajós e Rio Branco. In: ALMEIDA F.F.M. de & HASUI Y. (eds) *O Precambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher Ltda, p.6-35.
- CARVALHO A.S. 1997. *Integração de imagens de RADAR/JERS-1, TM/Landsat-5 e geofísicas para o mapeamento geológico da porção nordeste de Roraima, Brasil*. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, 247p.
- CHAVEZ Jr. J.P., BERLIN G.L., SOWERS L.B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, **8**:23-30.
- COSTA J.A.V. 1999. *Tectônica da região nordeste do estado de Roraima*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará, 315p.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). 1998. Projeto Roraima Central (folhas NA. 20-X-B e NA.20-X-D e parte das folhas NA. 20-X-A, NA. 20-X-C, NA. 21-V-A e NA. 21-V-C). [on line]. www.cprm.gov.br. Mai. 2001.
- LIMA M.I.C. 1984. Evolução geológica do Cráton Amazônico no Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 33, *Anais*, p.3032-3039.
- MELO A.F.F., SANTOS A.J., CUNHA M.T.P., CAMPOS M.J.F., D'ANTONA R.J.G. DAMIÃO R.N. 1978. *Projeto Molibdênio em Roraima*. Manaus, DNPM/CPRM, Relatório final, v.6.
- MONTALVÃO R.M.G., MUNIZ M.B., ISSLER R.S., DALL'AGNOL R., LIMA M.I.C., FERNANDES P.E. C.A., SILVA G.G. 1975. Geologia da folha NA.20 Boa Vista e parte das folhas NA.21 Tumucumaque, NB.20 Roraima e NB.21. In: Brasil. *Projeto RADAMBRASIL*. Rio de Janeiro, DNPM, . v.8, p.15-135.
- PINHEIRO S.S., REIS N.J., COSTI H.T. 1990. *Geologia da região de Caburaí. Nordeste de Roraima*. Manaus, DNPM/CPRM, Relatório final, 91p.
- PRIEM H.N.A., BOELRIJK N.A.I.M., HEBEDA E.H., VERDURMEN E.A.TH., VERSCHURE R.H. 1971. Isotopic ages of the Trans-Amazonian acidic magmatism and the Nickerie Metamorphic Episode in the precambrian basement of Suriname, South America. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**:1667-1680.
- SHIMABUKURO Y.E., NOVO E.M.L. de M., MERTES L.A.K. 1998. *Mosaico digital de imagens Landsat-TM da planície do rio Solimões - Amazonas no Brasil*. São José dos Campos, INPE, (INPE-6746-RPQ/681).
- TAVARES Jr. S.S. 2004. *Processamento de imagens e técnicas de integração de dados digitais para o estudo litológico e dos movimentos tectônicos no norte do estado de Roraima – Brasil*. Tese de Doutorado, INPE, 223p.
- TOUTIN T. & CARBONNEAU Y. 1992. La création d'ortho-images avec mne: description d'un nouveau système. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **18**:136-141.
- VENEZIANI P. & ANJOS C. E. 1982. *Metodologia de interpretação de dados de Sensoriamento Remoto e aplicações em Geologia*. São José dos Campos, INPE, (INPE-2227-MD/014), 54p.