

O papel de estruturas transtensivas no alojamento do Granito Central Serra dos Carajás: uma interpretação através de dados SAR banda L multipolarizados (HH, VV, HV), simulados do imageamento MAPSAR.

Athos Ribeiro dos Santos
Paulo Veneziani (in memoriam)
Waldir Renato Paradella

Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos, SP
{athos@ltid.inpe.br, waldir@ltid.inpe.br}

Abstract. MAPSAR simulated imagery were evaluated for geological studies in the western part of the Central Serra dos Carajás Granite (1.88 Ga) and related country rocks (Achaean units of Águas Claras Formation and Grão-Pará Group), in the Carajás Mineral Province (CMP), Brazilian Amazon. The L band multipolarized image (HH-VV-HV) simulated the medium resolution mode (10 meters, 3 looks, and descending pass) of MAPSAR, a feasibility study project carried out by INPE (Brazil) and the German Aerospace Agency (DLR). The objective is contributed to understanding about the emplacement of the anorogenic Central Granite. At the time of the Central Granite emplacement the evolution of CMP was characterized by a brittle transpressive tectonic, locally transtensive. The western boundaries of the massif are controlled by three systems of structural lineaments identified in the SAR image: NW-SE, ENE-WSW and NE-SW. Field observations shown that these systems corresponded to fracturing and are compatible with the tectonic – empirical model for strike-slip shear zones: Y, T and R', respectively. The geometric arrangement determined by the orientation of these structural lineament systems indicate transtension during the emplacement of the massif. This study suggests that transtensive structures like rhombo-chasms create favorable conditions to intruding the Central Serra dos Carajás Granite.

Palavras-chave: Granito Central Serra dos Carajás, Central Serra dos Carajás Granite, SAR, banda L, L band, MAPSAR

1. Introdução

Este estudo enfoca a borda oeste do Granito Central Serra dos Carajás, de idade proterozóica, e suas encaixantes arqueanas constituídas pelos sedimentos da Formação Águas Claras e pelas seqüências metavulcano-sedimentares do Grupo Grão-Pará.

O objetivo é contribuir para o entendimento sobre o alojamento do Granito Central Serra dos Carajás, através da caracterização de estruturas transtensivas interpretadas a partir de dados SAR banda L, multipolarizados e de alta resolução espacial, obtidos da simulação do satélite MAPSAR (ver detalhes no item seguinte).

A região da Serra dos Carajás, durante a época do alojamento do Granito Central, foi caracterizada por uma tectônica transpressiva rúptil, localmente transtensiva. A ótima definição dos elementos estruturais dos dados banda L multipolarizados permitiu identificar estruturas transtensivas do tipo *rhombo-chasms*, que exerceram um importante controle no alojamento do Granito Central Serra dos Carajás, sugerindo uma interpretação alternativa ao modelo clássico de diapirismo.

2. Simulação do imageamento do Satélite MAPSAR

Encontra-se, atualmente, em fase final de detalhamento (Fase A) um estudo de viabilidade de construção de um radar orbital, o MAPSAR (MAPSAR – Multi-Application Purpose SAR), através de uma cooperação entre o INPE e a Agência Aeroespacial da Alemanha (DLR). Detalhes

em Schröder et al. (2005). Uma das importantes atividades desenvolvidas nesta fase foi a simulação do imageamento orbital MAPSAR. Durante 2005 foi desenvolvida através da FAB e do CENSIPAM uma grande campanha de aquisição de dados com o sensor SAR-R99B a bordo de uma aeronave EMB-145, em oito áreas teste na Amazônia e no Semi-árido. Os sobrevôos seguiram especificações do imageamento orbital envolvendo: frequência (L), polarização (HH, VV, HV), resolução espacial (10m), azimute de visada (órbita descendente: 282°), incidência (feixes de alta incidência: 39,50° a 48,08°), *swath* (30 Km), tomadas estereoscópicas, etc.

O mosaico SAR utilizado neste trabalho simula o modo de média resolução do MAPSAR em composição colorida das três polarizações (L-HH-R, L-VV-G, L-HV-B), englobando grande parte do Granito Central e suas encaixantes à oeste e sul.

3. Síntese Geológica

A **Figura 1** localiza a área de estudo no mosaico de radar (L-HH-R, L-VV-G, L-HV-B) a partir do Mapa tectono-estratigráfico da Província Mineral de Carajás (Veneziani et al. 2004). A região investigada está incluída no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de idade arqueana (Araújo e Maia, 1991) e é constituída, essencialmente, por rochas metavulcânicas e metassedimentares principalmente do Supergrupo Itacaiúnas e pelos sedimentos arqueanos da Formação Águas Claras, que constituem o corpo das serras dos Carajás, Cinzento e Boqueirão. Os terrenos arrasados, que ocorrem no entorno dessas serras são formados, principalmente, por gnaisses tonalíticos a granodioríticos e meta-supracrustais do Complexo Xingu, além de extensas ocorrências de rochas granulíticas e charnoquíticas da Suíte Monte Bacajaí, a norte (DOCEGEO, 1988). O Granito Central Serra dos Carajás é um representante típico dos complexos graníticos anorogênicos mais antigos do Craton Amazônico. Idades de cerca de 1,88 Ga foram obtidas para o batólito e outros maciços anorogênicos que ocorrem nesta região, indicando que um importante magmatismo anorogênico ocorreu no final do Paleoproterozóico (Machado et al., 1991; Macambira e Lafon, 1995; Dall’Agnol et al., 1999). Importantes depósitos minerais que ocorrem na Serra dos Carajás (p. ex.: Breves e Águas Claras – Au, Cu) mostram uma conexão genética com esse magmatismo granítico (Tallarico et al., 2004).

Diversos autores propuseram modelos evolutivos de cunho regional, com o objetivo de caracterizar a evolução arqueana/paleoproterozóica do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, que se estende na direção WNW-ESE incluindo a Serra dos Carajás. Estes estudos identificaram eventos deformacionais (dúcteis a rúpteis), predominantemente transpressivos e direcionais que, ao longo do tempo, mostraram inversões no sentido da movimentação (Araújo e Maia, 1991; Oliveira et al., 1994; Costa et al., 1995; Pinheiro, 1997; Veneziani et al., 2004).

Veneziani et al. (2004), utilizando produtos de sensores remotos, aerogeofísica e dados, tanto bibliográficos quanto de campo, definiram para a região as seguintes fases de movimentação/deformação ao longo do Cinturão Itacaiúnas:

1 – Transpressiva sinistral com direção principal orientada segundo WNW-ESE, vergência de NE para SW e o desenvolvimento de zonas de cisalhamento de natureza dúctil. O cisalhamento progressivo não coaxial afetou as rochas embasamentais, os granitóides da Suíte Plaquê e as rochas dos grupos Sapucaia, Igarapé Pojuca e Igarapé Salobo;

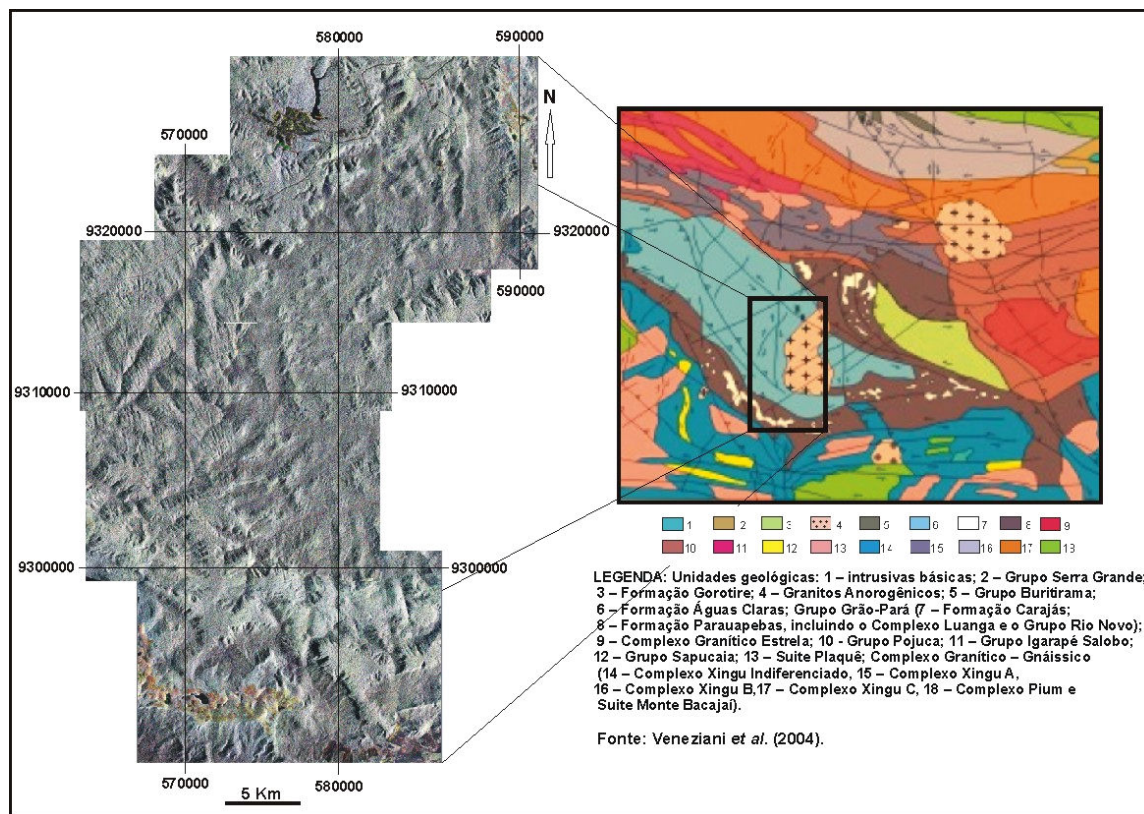


Figura 1. Localização da área de estudo em mosaico SAR banda L em composição colorida de três polarizações (L-HH, L-VV, L-HV), destacada a partir do Mapa tectono-estratigráfico da Província Mineral de Carajás (Veneziani et al., 2004).

2 – Transpressiva oblíqua, localmente transtrativa, com direção principal orientada em torno de WNW-ESE e vergência de NNW para SSE. Desenvolveram-se zonas de cisalhamento dúcteis a rúpteis – dúcteis, com inversão de movimentos em relação à primeira fase, ao longo das antigas linhas de fraquezas crustais. O cisalhamento progressivo não coaxial criou condições favoráveis à ocorrência de extensão (zonas transtrativas), deposição e extrusão de rochas vulcânicas, desde ultramáficas a intermediárias (Grupo Rio Novo, Complexo Luanga e Grupo Grão-Pará), bem como granitogênese sintectônica (granitos do tipo Estrela). Com a continuidade dos movimentos, tais rochas foram deformadas sob regime dúctil a rúptil. Ainda durante esta fase, podem ter ocorrido as condições necessárias de extensão e adelgaçamento crustal para a formação da bacia do Águas Claras;

3 – Transpressiva rúptil, localmente transtensiva, sinistral, com a direção principal orientada em torno de N70W e vergência de NE para SW. Ocorreu o desenvolvimento/reativação das antigas linhas de fraquezas crustais sob a forma de falhas transcorrentes, cujos principais exemplos são os sistemas de falhas de Carajás e Cinzento. Foram criadas as condições favoráveis, nos locais onde predominou a transtração, para a intrusão de plutons graníticos (p. ex: Granito Central, granitos anorogênicos) e diques, bem como para a formação da bacia do Buritirama;

4 – Reativação generalizada com movimentação principalmente na vertical e, secundariamente, lateral (destal) que afetou, inclusive, as regiões de contato dos granitos anorogênicos, e propiciou a formação da bacia do Gorotire;

5 – A partir do Neoproterozóico predominou a cinemática extensional, responsável por reativações das antigas linhas de fraquezas crustais. Tais reativações estão registradas nas ocorrências de sedimentos paleozóicos (Grupo Serra Grande), intrusivas básicas mesozóicas e coberturas terciárias.

4. Resultados

No mosaico SAR da **Figura 2A** estão representados, em vermelho, as principais direções de lineamentos estruturais fotointerpretados nesta região de ocorrência da Formação Águas Claras (AC), nas proximidades do contato com o Granito Central Serra dos Carajás (Gr). Em amarelo estão representadas as principais direções de estruturas rúpteis (sistemas de fraturas – juntas e falhas – obtidos por medidas estatísticas em campo nos pontos assinalados na **Figura 2A**) e sua associação ao modelo teórico da terceira fase de movimentação segundo modelo de Veneziani et al. (2004) (**Figura 2B**), época em que se deu o alojamento do Granito Central e o intenso cisalhamento rúptil, responsável pela estruturação da região.

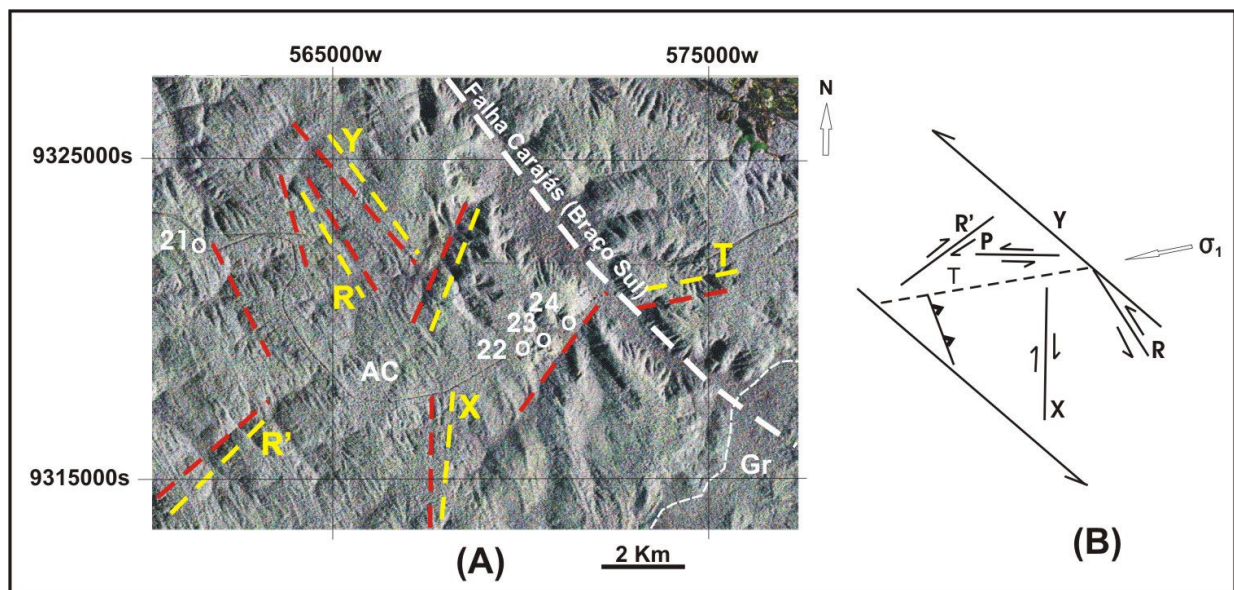




Figura 2. (A) Mosaico de radar banda L em composição colorida L-HH, L-VV, L-HV: Granito Central (Gr), Formação Águas Claras (AC), lineamentos estruturais , sistemas de fraturas , pontos de campo (22o); (B) Modelo teórico – empírico de ZCT rúptil.

As direções de lineamentos estruturais NW-SE (Y e R) são as mais frequentes e melhor representadas no mosaico SAR, apesar da sua posição desfavorável em relação ao azimute de iluminação (282°), por constituírem um sistema anastomosado paralelo ao intenso cisalhamento rúptil que originou, na região, o Falhamento Carajás (**Figura 2A**). A natureza rúptil dessa terceira fase de movimentação é atestada, também, pela presença de diques intermediários a básicos orientados, principalmente, segundo NW-SE. As direções posicionadas no quadrante nordeste,

apesar de menos freqüentes, puderam ser realçadas no mosaico SAR pela sua posição favorável em relação ao azimute de iluminação. Os lineamentos paralelos à estrutura P não puderam ser bem caracterizados nos dados SAR por serem sub-paralelos à iluminação.

O mosaico SAR (**Figura 3A**) mostra parte do contato SW do Granito Central (Gr) com os sedimentos da Formação Águas Claras (AC) e evidencia o controle estrutural ao longo desse contato, marcado, principalmente, por três sistemas de lineamentos orientados ENE-WSW, NE-SW e NW-SE. Interpretações dessa imagem e observações de campo caracterizaram esses lineamentos como estruturas rúpteis (falhas e fraturas) que podem ser correlacionadas (T, R' e Y, respectivamente) ao modelo teórico – empírico de deformação rúptil (**Figura 3B**) da terceira fase de movimentação (Veneziani et al., 2004).

A foto de campo da **Figura 3C** (localização na **Figura 3A**) mostra veio de quartzo com direção N70E ver. (caneta) no arenito silicificado, paralelo ao contato do granito neste ponto, atestando o caráter distensivo desta direção (T). O contato, neste ponto, é brusco, marcado por estruturas rúpteis ENE-WSW. A única indicação sobre metamorfismo de contato, observável no campo, é a silicificação do arenito Águas Claras próximo ao granito. Na borda NNE do granito alguns autores citam metamorfismo de contato e hornfels nas rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará (Macambira et al., 1990; Javier et al., 1995).

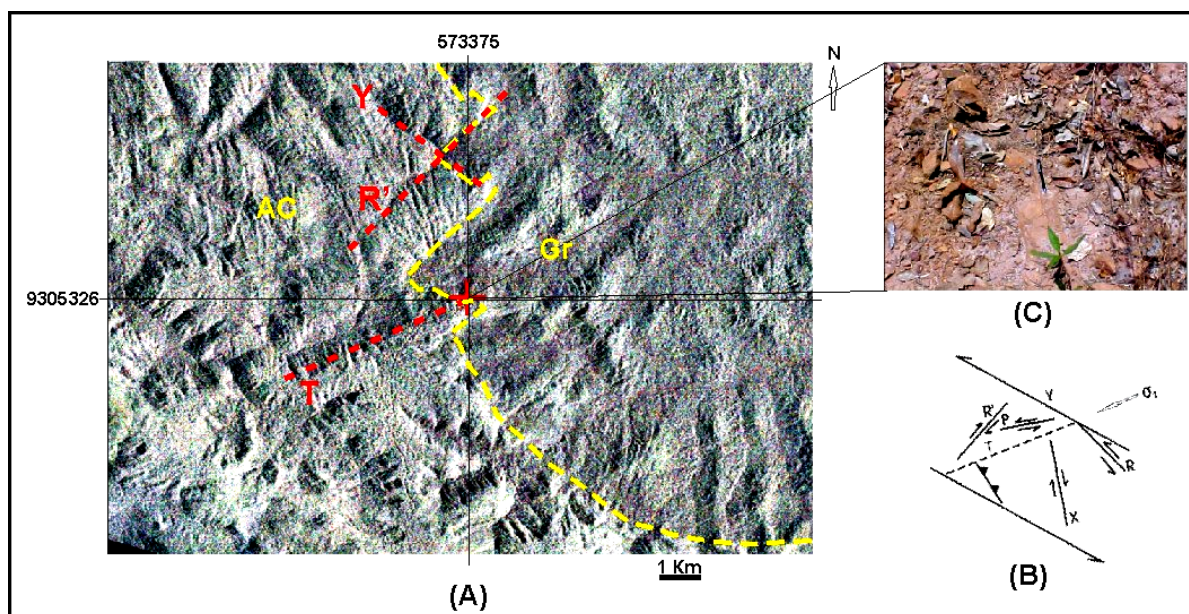


Figura 3. (A) Mosaico de radar banda L em composição colorida L-HH, L-VV, L-HV: contato Granito Central (Gr) – Formação Águas Claras (AC), lineamento estrutural; (B) Modelo teórico – empírico de ZCT rúptil; (C) Foto de campo com localização na imagem (+), caneta no veio de quartzo N70E ver. no arenito Águas Claras.

O mosaico SAR (**Figura 4A**) mostra parte do contato do Granito Central (Gr) com os sedimentos da Formação Águas Claras (AC). De forma semelhante à **Figura 3A**, os mesmos três sistemas de lineamentos ENE-WSW, NW-SE e NE-SW estão presentes, representado estruturas rúpteis correlacionáveis a T, Y e R' do modelo empírico – teórico de zona de cisalhamento rúptil (Fig. 3B), que esquematiza os movimentos da terceira fase de deformação (Veneziani *et al.*,

2004). Neste caso, os contatos parecem estar essencialmente alinhados segundo as direções NE-SW, e NW-SE (**Figura 4A**). A foto de campo da **Figura 4C** localiza-se no contato entre o Granito Central e os arenitos da Formação Águas Claras (ver **Figura 4A**). A tampa da câmara fotográfica encontra-se sobre o arenito silicificado, que se apresenta em blocos quebrados na forma de xenólitos angulosos no granito (lapiseira). Aqui, também, o arenito apresenta-se silicificado.

Estudos feitos a partir de dados litoestruturais e geofísicos em diversas regiões do planeta têm demonstrado uma estreita associação entre cinturões de cisalhamento e o alojamento de corpos graníticos (Paterson e Fowler, 1993; Vigneresse, 1995). Fraturas de distensão profundas resultantes de esforços regionais frequentemente estão associadas a falhas transcorrentes e podem resultar no alojamento de magmas em níveis crustais bastante rasos (Hutton, 1982). Segundo Hutton (1996), a forma mais comum de alojamento de corpos graníticos em zonas de cisalhamento se dá em porções extensionais, com forma romboédrica (*rhombo-chasms*), formadas por falhas ou zonas de cisalhamento transcorrente *en echelon*.

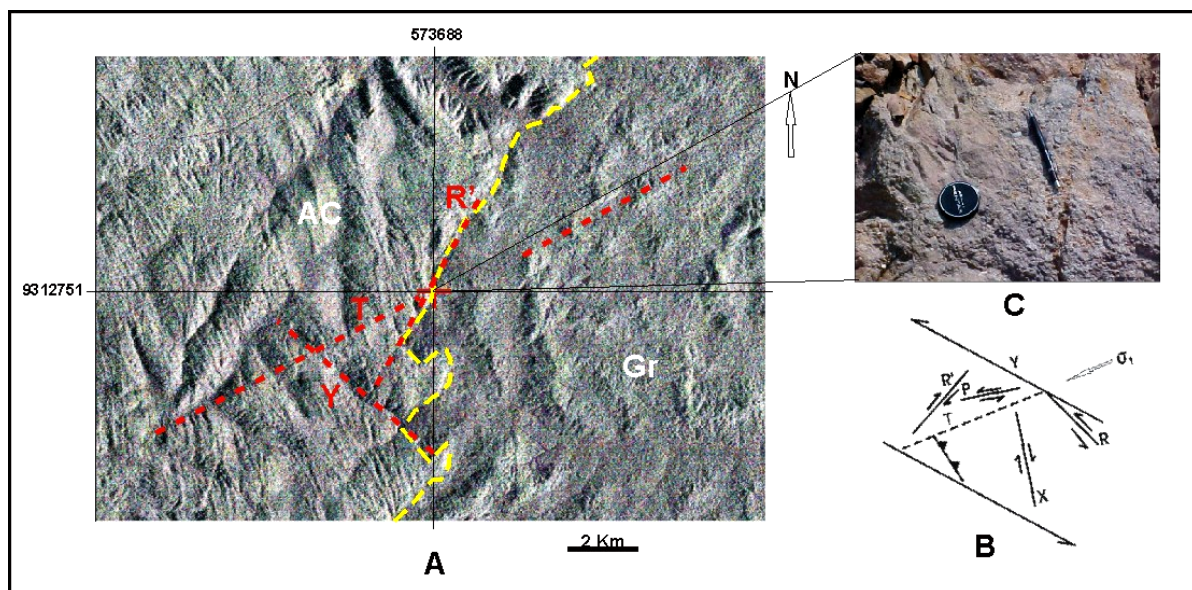


Figura 4. (A) Mosaico de radar banda L em composição colorida L-HH, L-VV, L-HV: --- contato Granito Central (Gr) – Formação Águas Claras (AC), --- lineamento estrutural; (B) Modelo teórico – empírico de ZCT rúptil; (C) Foto de campo com localização na imagem(+), tampa da câmara no arenito Águas Claras e lapiseira no granito.

A região da Serra dos Carajás, durante a época do alojamento do Granito Central, foi caracterizada por uma tectônica transpressiva rúptil (localmente transtensiva), com vergência de NE para SW, responsável, entre outros, pela movimentação sinistral dos sistemas de falhas Carajás e Cinzento (WNW-ESE). Dentro deste contexto predominantemente compressivo, áreas transtensivas localizadas puderam ser formadas pela combinação de direções trativas dentro desses sistemas de esforços. Na borda oeste do batólito, os contatos puderam ser observados com um bom nível de detalhe nas imagens SAR e, em parte confirmados no campo, posicionam-se, preferencialmente, segundo as direções estruturais ENE-WSW, NW-SE e NE-SW. Estas direções

são, de acordo com o modelo de esforços para a época de alojamento do maciço, predominantemente trativas (**Figura 5A**). Este estudo sugere que condições transtensivas localizadas, que favoreceram a formação de estruturas do tipo *rhombo-chasms* (**Figura 5B**), exerceram um importante controle no alojamento do Granito Central de Carajás.

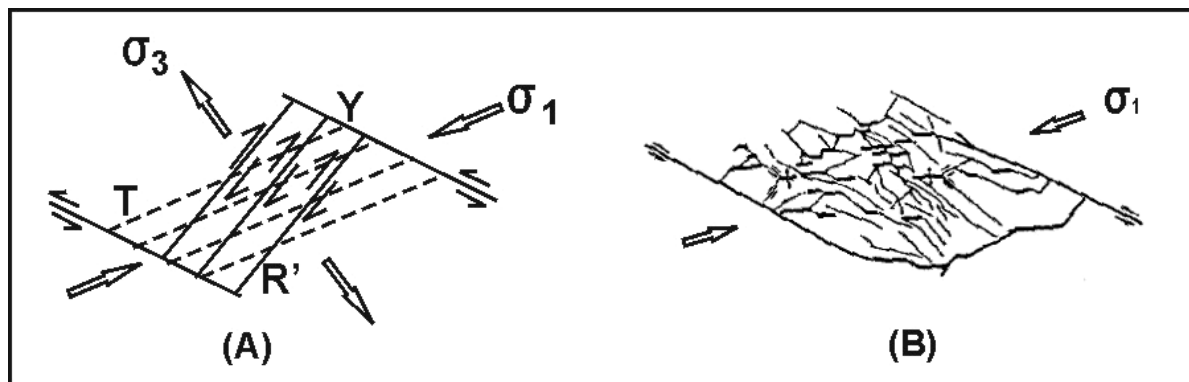


Figura 5. (A) Disposição dos três principais sistemas de lineamentos estruturais, sua associação às estruturas do modelo teórico – empírico de zona de cisalhamento rúptil, evidenciando seu caráter transtensivo; (B) Estrutura interna de um rhombo-chasms (Modificado de Sibson, 1986).

5. Conclusões

O mosaico SAR banda L utilizado no trabalho, em composição colorida multipolarizada (L-HH, L-VV, L-HV), mostrou-se eficiente para os objetivos do estudo. O ótimo realce morfológico e o bom nível de detalhe garantiram a precisão na identificação do contato do Granito Central com as encaixantes e a definição dos principais lineamentos estruturais que determinam este contato.

Lineamentos estruturais paralelos às zonas de cisalhamento sintéticas P, que a literatura cita como também comuns em estruturas do tipo *rhombo-chasms*, não puderam ser caracterizados com precisão e continuidade ao longo do contato analisado, provavelmente, pela sua posição desfavorável em relação ao azimute de iluminação do SAR (282°). Problemas deste tipo serão superados pela versatilidade do imageamento MAPSAR, que permitirá observações à direita e a esquerda das órbitas descendente e ascendente e pela disponibilidade de estereoscopia que favorecerá a visualização do terreno.

Referências

- Araújo O.J.B., Maia R.G.N. **Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A**. Relatório Final. CPRM, Rio de Janeiro, 1991, 136p
- Costa J.B.S., Araújo O.J.B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono – estruturais, estratigráficos e geocronológicos. **Bol. do Museu Paraense Emílio Goeldi** (Série Ciências da Terra), 7: 199-235, 1995.
- Dall’Agnol R., Costi H.T., Leite A.A., Magalhães M.S., Teixeira N.P. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. **Precambrian Research**, 95:9-39, 1999.
- DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, 1988, Belém. **Anexo...** Belém, 1988, p.10-54.

- Hutton D.H.W. A tectonic model for the emplacement of the Main Donegal Granite, NW Ireland. **J. Geol. Soc London**, **139**: 615-631, 1982.
- Hutton D.H.W. The “space problem” in the emplacement of granite. **Episodes**, **19**(4): 114-119, 1996.
- Javier Rios F., Villas R.N., Dall’Agnol R. O Granito Serra dos Carajás, Pará: Fácies petrográficas e evolução petrológica do setor norte. **Revista Brasileira de Geociências**, **25**(1):20-31, 1995.
- Machado N., Lindenmayer Z., Knough T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb Geochronology of Archean Magmatism and Basement Reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**:329-354.
- Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Figueiras A.J.M. 1990. *Projeto Pojuca*. Relatório Final, DNPM/DOCEGEO/UFPA, Belém.
- Macambira J.B. & Lafon J.M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese de dados e novos desafios. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra**, **7**:263-288, 1995.
- Oliveira J.R. de, Silva Neto C.S., Costa E.J. de S. **Serra Pelada, Folha SB.22-X-C**. Relatório Final. CPRM, Brasília, 1994, 220p.
- Paterson S.R. & Tobish O.T. Using pluton ages to date regional deformations: problems with commonly used criteria. **Geology**, **16**: 1108-1111, 1988.
- Pinheiro R.V.L. **Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike Slip Systems, Amazon, Brazil**. 1997. 408p. Ph.D Dissertation, University of Durham, UK, 1997.
- Schröder R., Puls J., Hajsek I., Jochim F., Neff T., Kono J., Paradella W.R., Silva M.M.Q., Valeriano D.M., Costa M.P.F. MAPSAR: a small L-band SAR mission for land observation. **Acta Astronautica**, **56**: 35-43, 2005.
- Sibson R.H. Earthquakes and lineaments infrastructure. **Phil. Trans. Roy. Soc.**, **A317**: 63-79, 1986.
- Tallarico, F.H.B., McNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R., Figueiredo B.R., Carvalho J.B., Rego J.L., Nunes A.R. Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au (W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil. **Mineralium Deposita**, (2004) **39**: 68-86, 2004.
- Veneziani P., Santos A.R., Paradella W.R. A evolução tectono – estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM Landsat-5), aerogeofísica e dados de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, **34**(1):67-78, 2004.
- Vigneresse J.L. Crustal regime of deformation and ascent of granitic magma. **Tectonophysics**, **249**: 187-202, 1995.