

## Utilização de um par estereoscópico de imagens Ultra-fine do RADARSAT-2 em uma análise estrutural no Vale do Rio Curaçá, Bahia.

Athos Ribeiro dos Santos  
Waldir Renato Paradella  
Cleber Gonzalez de Oliveira  
Arnaldo de Queiroz da Silva  
Rogério Ribeiro Marinho

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{athos, waldir}@itid.inpe.br, {cleber, arnaldo, rogerio}@dsr.inpe.br

**Abstract.** The Curaçá River Valley, an important Cu-rich district of the Bahia state, is part of the São Francisco Craton. The lithological units in the region of Curaçá River Valley can be grouped as Archean gneisses and granulites interbedded with ferruginous rocks, quartzites, amphibolites, mafic-ultramafic intrusives and Upper Proterozoic marbles/limestones, schists, and phyllites. The gneissic-granulitic complex is cut by Cu-mineralized intrusives. Massive and disseminated sulfides are associated with pyroxenites and weak disseminated sulfides to norites, gabbro-norites, and anorthosites. The test-site is part of the archaic and paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton and encompasses granulitic and gneissic rocks. During the Paleoproterozoic Transamazonian Cycle in the Bahia state four archaic crustal segments (Gavião, Jequié, Serrinha and Itabuna-Salvador-Curaçá) collided resulting in crustal thickening, re-orientation of the geological structures in a north-south trending and the formation of an important paleoproterozoic mountain belt (Itabuna-Salvador-Curaçá Belt - ISCB). The study area is partially located in ISCB, a north-south trending granulite-amphibolite belt, and partially located in Serrinha block, composed of orthogneisses and migmatites. Ultra-fine C-band high-resolution images of the RADARSAT-2 were used in a structural detailed study through visual stereoscopic analysis in the 3D Stereo package of the PCI Geomatics software (3D visualization computer system). The results of the study showed: 1- There are a well-defined structural unconformity marked in SAR images by two different sets of metamorphic foliations in the region near the contact Serrinha block – ISCB; 2- the litho-structural control is defined in the contact between migmatitic rocks (metamorphic foliation N10°-20°E) and gneissic rocks (metamorphic foliation N20°-30°E); 3- kinematic analysis (SAR images and field observations) indicates ductile deformation with sinistral movement along N10°-20°E metamorphic foliation; 4- the litho-structural arrangement in the rocks of this region reflect the paleoproterozoic collisional events.

**Palavras-chave:** Ultra-fine RADARSAT-2, 3D Stereo, structural analysis, Curaçá River Valley, RADARSAT-2 Ultra-fine, 3D Stereo, análise estrutural, Vale do Rio Curaçá.

### 1. Introdução

A área de estudo situa-se na região do Vale do Rio Curaçá, um importante distrito cuprífero no norte do estado da Bahia. As mineralizações de cobre estão associadas às rochas máfico-ultramáficas, num total de três centenas de corpos potencialmente mineralizados (Delgado e Souza 1975, Lindenmayer 1981, D'el-Rey Silva 1996). O clima na área é semi-árido, com pluviosidade (500-700 mm/ano) de distribuição bastante irregular. A topografia é plana, marcada por uma superfície de pediplanação (350-430 m) onde sobressaem os inselbergs das serras Redonda (560 m) e Canabrava (750 m). A vegetação é, em grande parte, esparsa típica de caatinga. Os solos são residuais rasos, arenosos a argilosos e, com frequência, apresentam relação direta com o substrato rochoso (Paradella e Vitarello 1995).

O atual estudo utiliza imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) banda C-HH do satélite RADARSAT-2, de alta resolução espacial (3 metros), no modo Ultra-Fine, em um par estereoscópico analisado no pacote 3D Stereo do software PCI Geomatics com o objetivo de detalhar as feições estruturais da área de estudo e analisar as relações entre elas e os tipos litológicos.

### 2. Contexto Geológico

A região onde se situa a área de estudo engloba setores do embasamento do Cráton São Francisco e de suas coberturas (Almeida 1977) (Figura 1).

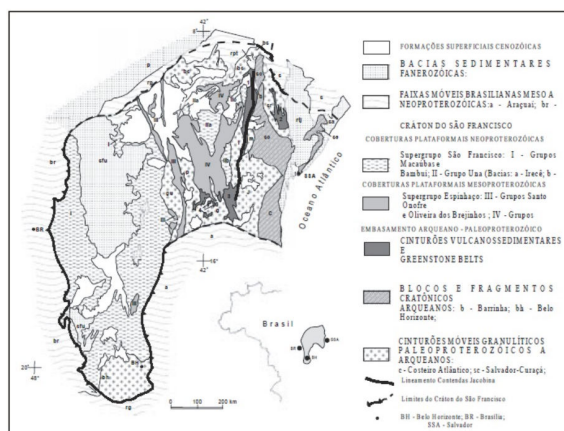


Figura 1. Principais compartimentos Tectônicos do Cráton do São Francisco (modificado de Alkimin et al. 1993 por Kosin et al. 2003).

O Cráton São Francisco no estado da Bahia é o resultado da colisão paleoproterozóica de quatro segmentos crustais arqueanos (blocos Gavião, Jequié, Serrinha e Itabuna-Salvador-Curaçá) (Figura 2A). O movimento convergente que ocasionou a colisão dos blocos arqueanos deu-se na direção NW-SE e resultou numa reorientação das unidades e estruturas geológicas para uma direção próxima a norte-sul, com forte encurtamento crustal E-W e com movimento global de sentido sinistral (Figura 2B). Essa Orogênese Paleoproterozóica resultou na formação de uma importante cadeia de montanhas (cinturão móvel polideformado) denominada de Orogênio Itabuna-Salvador-Curaçá (OISC) (Barbosa & Sabaté 2002, 2003, 2004, Barbosa et al. 2003).

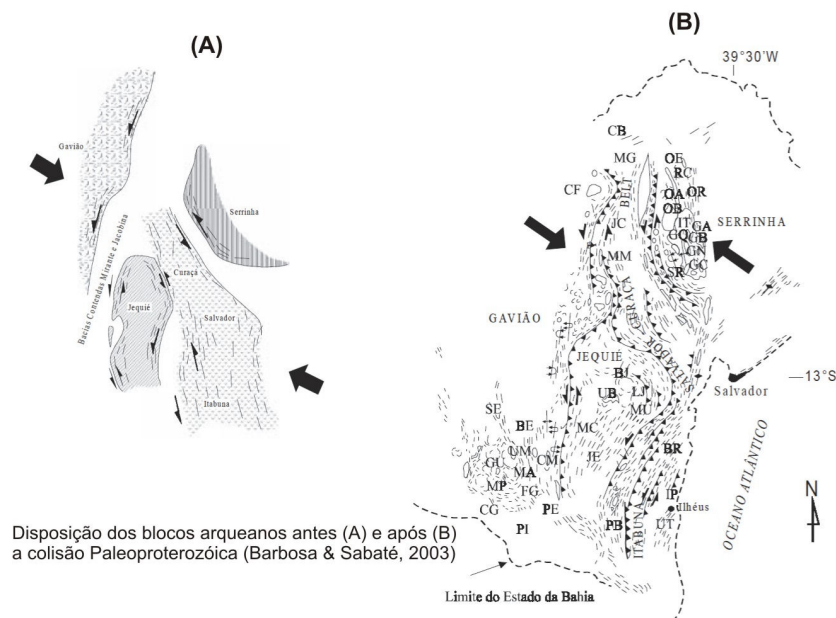
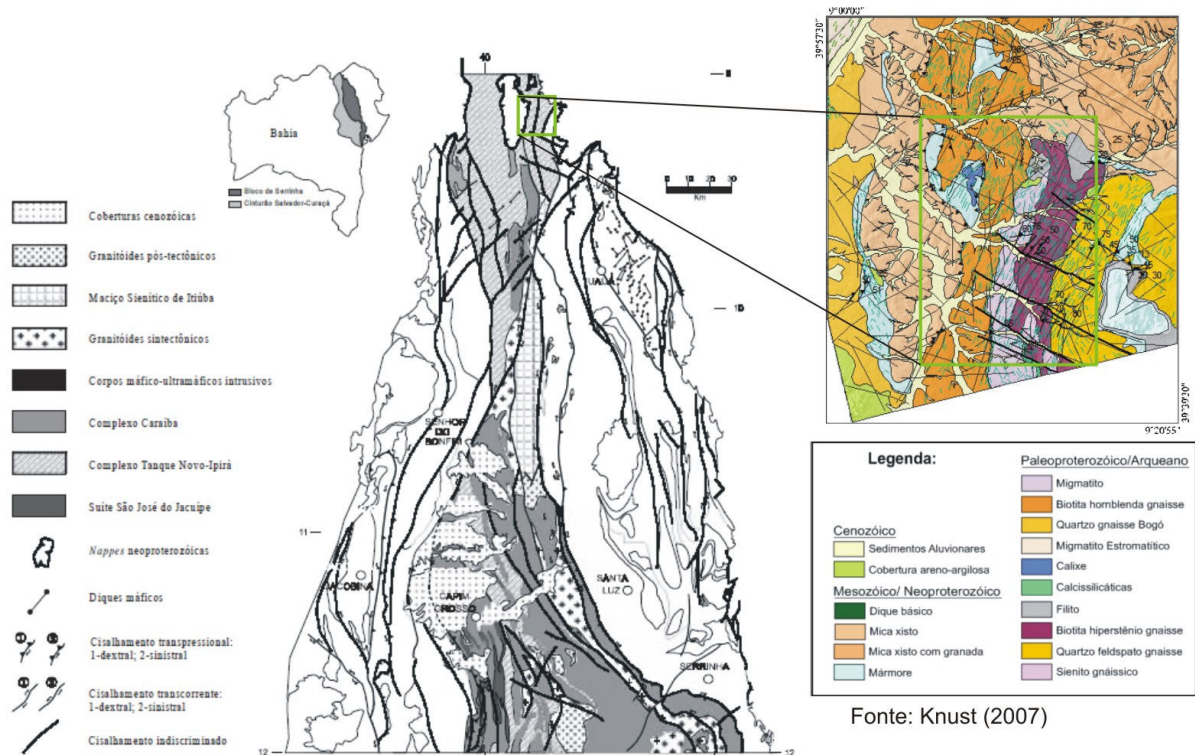


Figura 2. Evolução paleoproterozóica do Cráton São Francisco no estado da Bahia.

A área objeto dessa pesquisa situa-se no setor norte do OISC (Figura 3), em área limítrofe aos gnaisses e migmatitos (Complexo Santa Luz) que constituem, à leste, o embasamento arqueano do Bloco Serrinha (Figura 4). O OISC é representado, na região, por ortognaisses,

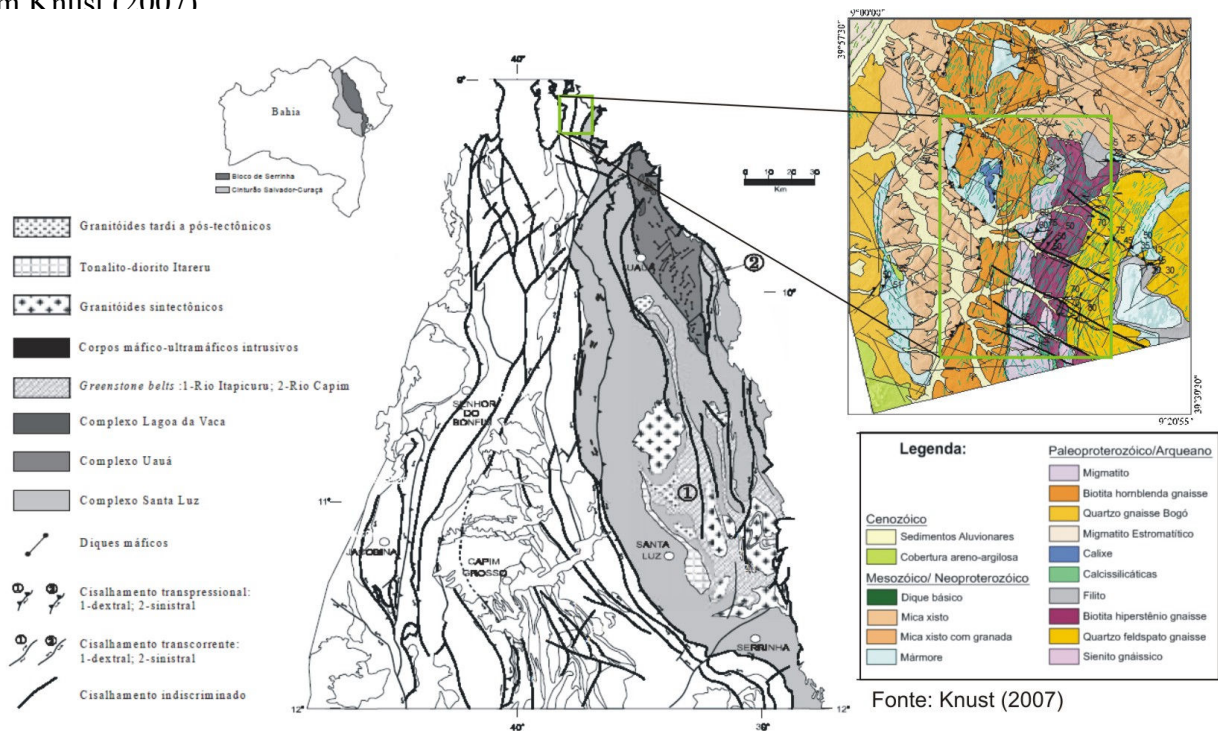
rochas granulíticas (Complexo Caraíbas), rochas máficas (Suíte São José do Jacuipé) e meta-supracrustais (Complexo Tanque Novo-Ipirá), todos de idades arqueanas.



Fonte: Knust (2007)

Mapa Geológico do Cinturão Salvador-Curaçá (Kosin et al, 2003)

Figura 3. Mapa Geológico do OISC de Kosin et al. (2003) e detalhe da área de estudo baseado em Knust (2007)



Fonte: Knust (2007)

Mapa Geológico do Bloco Serrinha (Kosin et al, 2003)

Figura 4. Mapa Geológico do Bloco Serrinha de Kosin et al. (2003) e detalhe da área de estudo baseado em Knust (2007).

### 3. Base de Dados & Métodos

A Tabela 1 especifica as imagens RADARSAT-2 utilizadas na pesquisa.

Tabela 1. Principais características das imagens RADARSAT-2 utilizadas.

Modo	Posição	Resolução (m)	Incidência		Polarização	Azimute
			Near	Far		
Ultra-Fine	U8	3	35,6°	36,9°	C-HH	282° (D)
	U24	3	46,8°	47,7°	C-HH	282° (D)

Os dados SAR foram utilizados em um par estereoscópico (U8D X U24D, figura 5) analisado no pacote 3D Stereo do software PCI Geomatics (sistema computadorizado para visualização tridimensional de imagens epipolares de um estéreo-par em um painel estereoscópico, figura 6) com o objetivo de detalhar as feições estruturais da área de estudo e analisar as relações entre elas e os tipos litológicos. A fotointerpretação geológica foi baseada em critérios morfoestruturais estabelecidos para imagens ópticas de baixa resolução espacial (Veneziani e Anjos 1982), adaptados às características peculiares das imagens SAR (Santos et al. 2001). Os elementos texturais identificados nas imagens de radar (drenagem, relevo e tonalidade) foram ordenados e classificados segundo critérios morfoestruturais que permitiram associar-lhes um significado geológico.

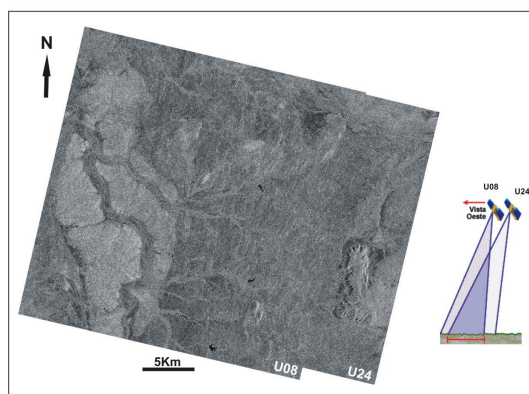


Figura 5. Par estereoscópico de imagens RADARSAT-2 Ultra-Fine (U8D x U24D).



Figura 6. Sistema computacional 3D Stereo: (A) princípios e (B) equipamentos.

### 4. Resultados

Trabalhos anteriores (Knust 2007; Rabelo et al. 2008) observaram, em imagens de sensoriamento remoto, duas diferentes orientações de feições lineares com ampla distribuição nessa região do Vale do Rio Curaçá, que foram associadas às duas principais foliações metamórficas. Uma delas, a de distribuição mais ampla na área, é paralela a estruturação

regional de orientação N10°-20°E. A segunda, de orientação N20°-30°E e restrita às unidades na porção leste da área, parece marcar um limite lito-estrutural entre dois conjuntos rochosos: um com predomínio de rochas migmatíticas e outro, a leste, com rochas gnáissicas (biotita-hiperstênio gnaiss).

A figura 7 identifica a área de superposição estereoscópica no par de imagens RADARSAT-2 Ultra-Fine e realça, em vermelho no mapa geológico, a área foco desse estudo. Nesta área, foram analisadas as relações lito-estruturais entre os conjuntos litológicos embasamentais (migmatito, biotita-hornblenda gnaiss, quartzo gnaiss Bogó e biotita-hiperstênio gnaiss) e as estruturas geológicas regionais, dentro do contexto evolutivo das colisões paleoproterozóicas, na região limítrofe entre o Bloco Serrinha e o OISC.

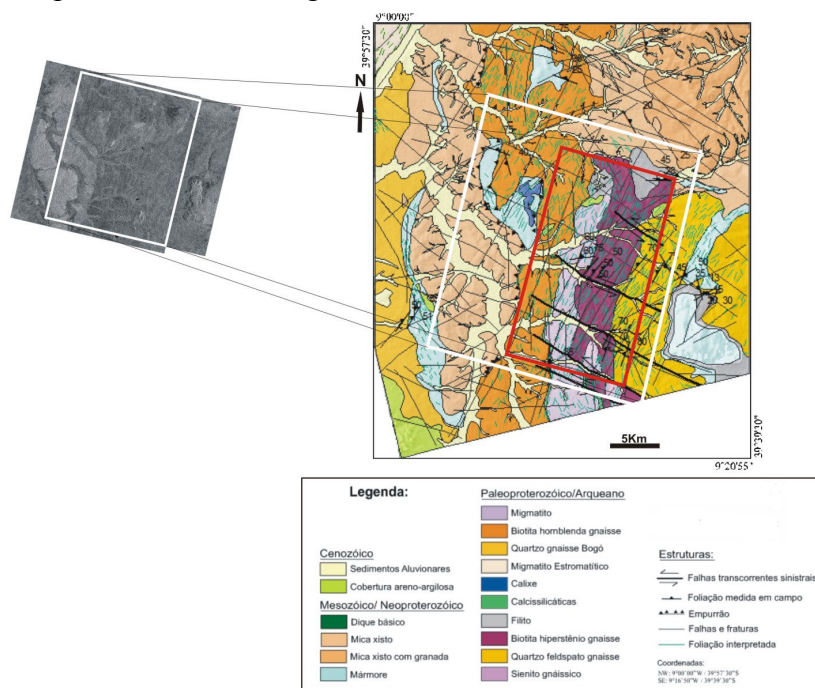


Figura 7. Área de superposição estereoscópica no par de imagens RADARSAT-2 Ultra-Fine e, em vermelho no mapa geológico, a área foco desse estudo.

A figura 8 mostra a distribuição das feições lineares na área de estudo identificadas no par de imagens Ultra-Fine através do Sistema Computadorizado 3D Stereo e associadas às principais foliações metamórficas regionais.

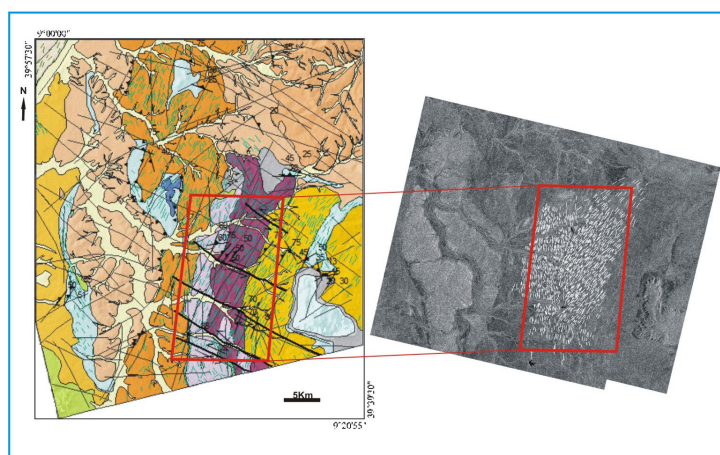


Figura 8. Distribuição das feições lineares na área de estudo identificadas no par de imagens Ultra-Fine.

A figura 9 superpõem os limites mapeados dos conjuntos litológicos sobre o mapa de feições lineares obtidas do par estereoscópico Ultra-fine. Esta superposição evidencia o controle lito-estrutural marcado pela discordância estrutural das foliações metamórficas, a leste ( $N20^{\circ}-30^{\circ}E$ ) e a oeste ( $N10^{\circ}-20^{\circ}E$ ) do limite entre os conjuntos litológicos migmatito e biotita-hiperstênio gnaisse.

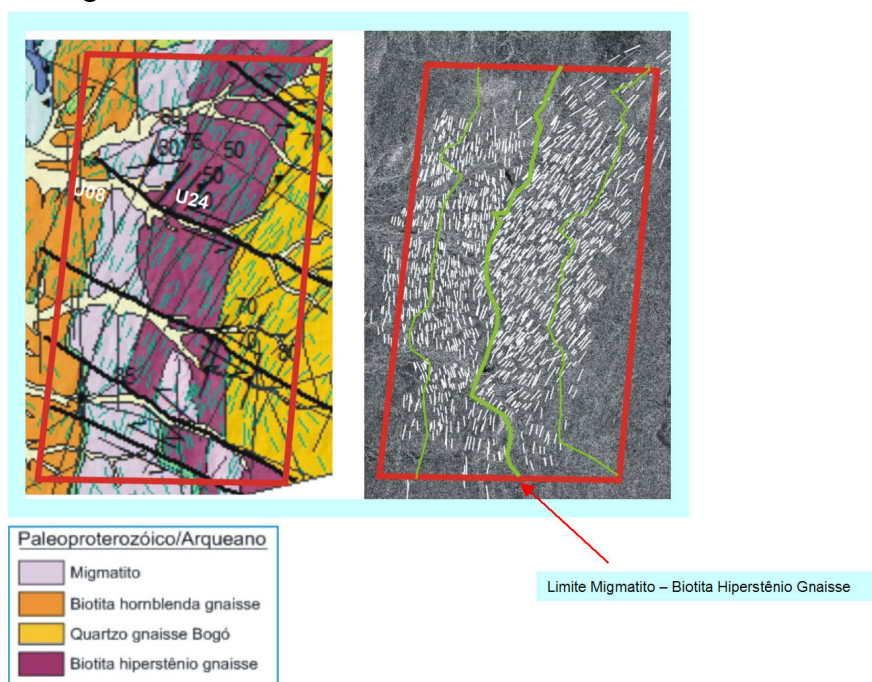


Figura 9. Controle lito-estrutural marcado pela discordância estrutural das foliações metamórficas, a leste ( $N20^{\circ}-30^{\circ}E$ ) e a oeste ( $N10^{\circ}-20^{\circ}E$ ) do contato entre os conjuntos litológicos migmatito e biotita-hiperstênio gnaisse.

Medidas de campo em perfis cruzando o contato entre esses dois conjuntos litológicos confirmaram esse controle lito-estrutural configurando uma discordância estrutural com variação média de  $20^{\circ}$  entre suas foliações metamórficas (Fig. 10A, B).

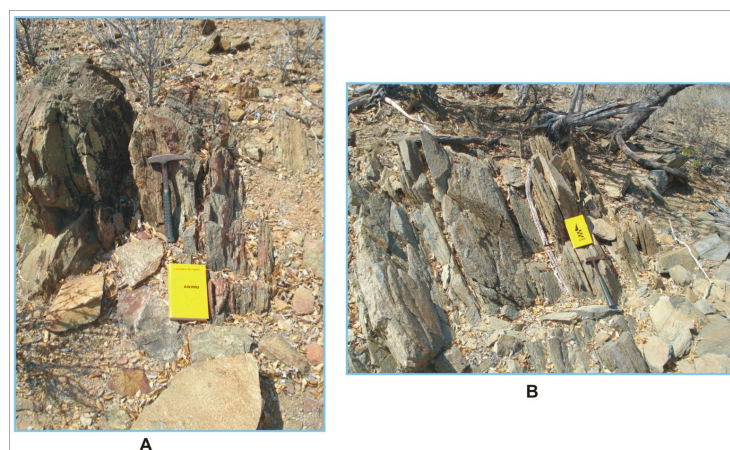


Figura 10. (A) Rocha gnáissica intensamente migmatizada e alterada (Unidade Migmatito) com foliação (martelo)  $N10^{\circ}E$ /subvert. NW (localização: 8980644N; 412779E) e (B) Rocha

gnáissica alterada (Unidade Biotita-hiperstênio gnaiss) com foliação N30°E/subvert. NW (localização: 8980170N; 413480E).

Os dados interpretados das imagens SAR mostram que a foliação N20-30E dos gnaisses tem uma terminação assintótica ao se aproximar do limite dos migmatitos, constituindo um indicador cinemático de uma deformação dúctil sinistral ao longo da foliação N10°-20°E dos migmatitos (Fig. 11A). Observações de campo confirmaram essa cinemática (Fig. 11B), que está em conformidade com os eventos colisionais paleoproterozóicos, em particular entre os blocos Itabira-Salvador-Curaçá e Serrinha, que resultaram na estruturação regional próximo a N-S e com sentido de movimentação global sinistral (Fig. 11C).

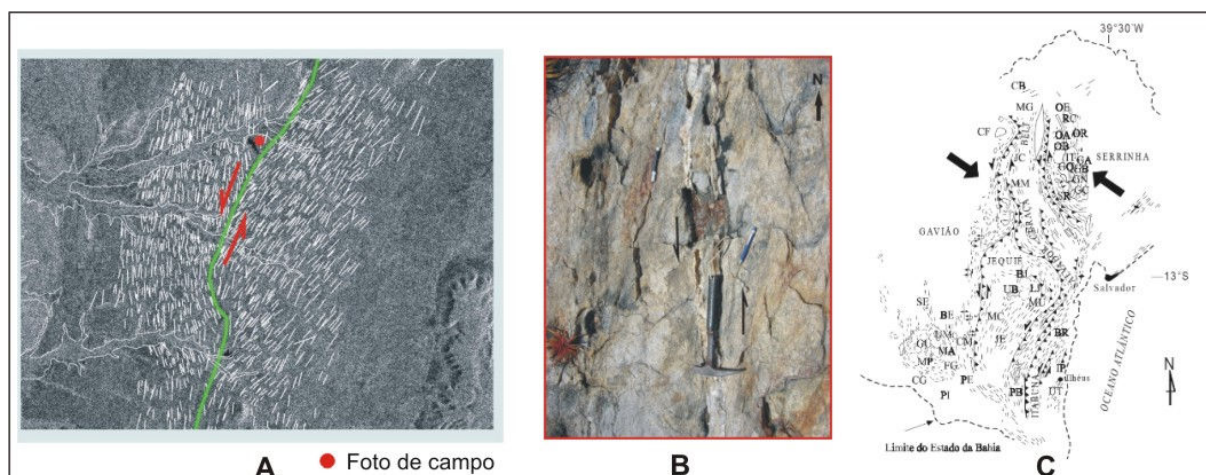


Figura 11. (A) Indicador cinemático de arrasto dúctil sinistral da foliação N20°-30° em relação a N10°-20° e localização (•) da (B) foto de campo mostrando a mesma cinemática (martelo na foliação regional N10°E/subvert. NW e canetas na foliação N30°E/subvert. NW) e (C) disposição dos blocos arqueanos após a colisão Paleoproterozóica (Barbosa e Sabaté 2003).

## 5. Conclusões

1- Há uma discordância estrutural bem definida entre as foliações metamórficas (interpretadas nas imagens e observadas no campo) na área próxima ao limite entre o Cinturão Salvador-Curaçá e o Bloco Serrinha;

2- Há um controle lito-estrutural definido no contato entre o conjunto litológico de rochas migmatíticas (foliação N10°-20°E) e os gnaisses (foliação N20°-30°E), a leste;

3- Nas imagens SAR, a foliação N20°-30°E dos gnaisses tem uma terminação assintótica ao se aproximar do limite dos migmatitos, constituindo um indicador cinemático de uma deformação dúctil sinistral ao longo da foliação N10°-20°E dos migmatitos. Essa cinemática foi confirmada por observações de campo e;

4- Esse arranjo lito-estrutural impresso nessas rochas do embasamento arqueano parece estar em consonância com os eventos colisionais paleoproterozóicos, em particular entre os blocos Itabira-Salvador-Curaçá e Serrinha, que resultaram na estruturação regional próximo a N-S e com sentido de movimentação global sinistral.

## Referências Bibliográficas

Alkmim, F.F.; Brito Neves, B.B.; Alves, J.A.C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: Misi, A.; Dominguez, J.M.L. (eds.) *O Cráton do São Francisco*, Salvador, SBG, 45-62, 1993.

Almeida, F.F.M. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geoc.*, 7(4):349-364, 1977.

- Barbosa, J.S.F.; Sabaté, P. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: a synthesis. **Anais da Acad. Bras. de Ciências**, 74:343-359, 2002.
- Barbosa, J.S.F.; Sabaté, P. Colagem paleoproterozóica de placas arqueanas do Cráton do São Francisco. **Rev. Bras. Geoc.**, 33(1-Suplemento):7-14, 2003.
- Barbosa, J.S.F.; Sabaté, P. Archean Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, 133(2004):1-27, 2004.
- Barbosa, J.S.F.; Sabaté, P.; Marinho, M.M. O Cráton do São Francisco no Bahia: uma síntese. **Rev. Bras. de Geoc.**, 33(1):3-6, 2003.
- Delgado, I.M.; Souza, J.D. **Projeto Cobre Curaçá – Relatório Final – Geologia Econômica do Distrito Cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil**. 30 volumes, convênio DNPM/CPRM, 1975.
- D’el-Rey Silva, L.J.H. Implication of the Caraiba deposit’s structural controls on the emplacement of the Cu-bearing hypersthenites of the Curaçá Valley, Bahia-Brazil. **Rev. Bras. Geoc.**, 26(3):181-196, 1996.
- Knust, S. S. A. **Avaliação das imagens RADARSAT-1 sob diferentes geometrias de observação em aplicação geológica no Vale do Rio Curaçá (Bahia)**, 2007. 127 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- Kosin, M.; Melo, R.C.; Souza, J.D.; Oliveira, E.P.; Carvalho, M.J.; Leite, C.M.M. Geologia do segmento norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá e guia de excursão. **Rev. Bras. de Geoc.**, 33(1-suplemento):15-26, 2003.
- Lindenmayer, Z.G. **Evolução geológica do Vale do Curaçá e de corpos máfico-ultramáficos mineralizados a cobre**, 1981. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1981.
- Paradella, W.R.; Vitorello, I. Geobotanical and soil spectral investigation for rock discrimination in the “Caatinga” environment (Brazil) based on multitemporal remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 21, 1: 52-59, 1995.
- Rabelo, T.N.; Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Knust, S.S.A; Mura, S.S. Avaliação de imagens multipolarizadas de radar (banda L) do sensor SAR-R99B para mapeamento geológico no baixo Vale do Curaçá, Bahia. **Rev. Bras. de Geoc.**, 38(4): 706-721, 2008.
- Santos, A. R.; Veneziani, P.; Paradella, W.R.; Morais M.C. **Radar Aplicado ao Mapeamento Geológico e a Prospecção Mineral: Aplicações**. Curso INPE-ADIMB, São José dos Campos, 21-26 de Agosto de 2000. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001, 103 p. (INPE-8117-PUD/45).
- Veneziani, P.; Anjos, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1982. 68 p (INPE-2227-MD/014).