

Avaliação inicial de dados do radar orbital PALSAR, em imagens FBD e integrações digitais com dados aerogamaespectrométricos (K, U, Th, CT), em estudos geológicos na região de Águas Claras, Província Mineral de Carajás.

Athos Ribeiro dos Santos
Waldir Renato Paradella
Arnaldo de Queiroz da Silva
Cleber Gonzalez de Oliveira
Thiago Gonçalves Rodrigues

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

Abstract. The L-band multi-polarized (HH, HV) PALSAR imagery and high-resolution gamma ray data (K, U, Th, TC channels) were evaluated for geological studies in the Águas Claras region, site of the important Cu-Au (W-Bi-Sn) deposit in the central part of the Carajás Mineral Province (CMP), Brazilian Amazon. Airborne high-resolution geophysical digital data were provided by VALE mining company and were integrated with PALSAR images through pseudo-tables and IHS transform. The RGB-IHS integration of PALSAR with gamma data produced image patterns with color variations expressing changes of the bedrock radioelements, while SAR contributed to the enhancement of textural patterns. The gamma Total Count (CT) responses include a contribution of K, U, and Th radiations and were more reliable for rock discrimination. The studied area encompasses Archean units of the Grão Pará Group (metavolcanics and banded iron formations) and the Águas Claras Formation (sedimentary rocks), the western part of the Central Serra dos Carajás Granite (1.88 Ga) and extensive tertiary lateritic covers. At the time of the Central Granite emplacement the evolution of CMP was characterized by a brittle transpressive tectonic, locally transtensive. The systems of structural lineaments striking NW-SE were enhanced under ascending pass, while NE-SW systems were highlighted with descending pass. The structural arrangement suggests the presence of transtensive structures NW-SE and ENE-WSW (Y and T, respectively, in the theoretic – empirical model for strike-slip shear zone), important for the migration of hydrothermal fluids responsible for the re-concentration of the ore elements in the Águas Claras deposit. The RGB-IHS integration of PALSAR with gamma K showed spatial relationships of Y and T structures with K anomalies.

Palavras-chave: PALSAR, airborne gamma ray data, geology, Carajás, PALSAR, dados aerogamaespetrométricos, geologia, Carajás.

1. Introdução

Este estudo objetivou avaliar a aplicabilidade das imagens de radar banda L do sensor orbital PALSAR (*Phased Array type L-band SAR*) em um estudo geológico na região de Águas Claras, uma área com importantes ocorrências minerais conhecidas (Au, Cu, Mn, Fe, etc.), inserida na Província Mineral de Carajás, na Amazônia Brasileira (Figura 1). As imagens PALSAR apresentam atributos como a alta resolução espacial, a multi-polarização e a polarimetria, uma grande variação na geometria de observação (incidência e azimute) permitindo, inclusive, medições estereoscópicas e interferométricas. Nesta pesquisa foram analisadas as imagens PALSAR FBD (*Fine Beam Dual*), em órbitas ascendentes e descendentes, e integrações digitais (RGB-IHS) destas imagens com dados gamaespectrométricos de alta resolução nos canais U, Th, K e CT (dados fornecidos pela Vale do Rio Doce -VALE). Estas integrações permitiram adicionar às informações texturais (geometria superficial), que são características dos dados SAR, indicações sobre variações composicionais superficiais fornecidas pelos dados radiométricos.

2. Contexto Geológico

A Província Mineral de Carajás (PMC) situa-se na porção sudeste do cráton do São Francisco. As unidades mais antigas da região (Figura 1) que inclui a PMC são os complexos Granulítico Pium, com idades SHRIMP U-Pb em zircão de ~3,00 Ga para os protólitos e 2,85 Ga para as assembléias granulíticas (Pidgeon et al. 2000) e Xingu, com idades U-Pb em zircão de ~2,85 Ga para os granitóides gnáissicos (Machado et al. 2001). Sobre esse embasamento ocorrem as metavulcânicas e formações ferríferas bandadas do Supergrupo Itacaiúnas, com idades U-Pb em zircão de ~2,76 Ga (Machado et al. 1991). O Supergrupo Itacaiúnas é superposto por uma seqüência de sedimentos marinhos e fluviais da Formação Águas Claras, com idades de ~2,70 Ga (Araújo e Maia 1991, Nogueira et al. 1995). O Supergrupo Itacaiúnas é cortado por diversos tipos de granitóides, com idades U-Pb e Pb-Pb em zircão variando entre 2,76 e 2,73 Ga (cf. Dall’Agnol et al. 2006), com exceção do Granito Old Salobo, com idades U-Pb em zircão de ~2,57 Ga (Machado et al. 1991). Os granitos da Suíte Plaqué apresentam idades de ~2,73 Ga (Avelar 1996). O Paleoproterozóico é marcado por um intenso magmatismo granítico do tipo A, representado pelos maciços Central, Cigano, Pojuca (~1,88 Ga, Machado et al. 1991) e Rio Branco.

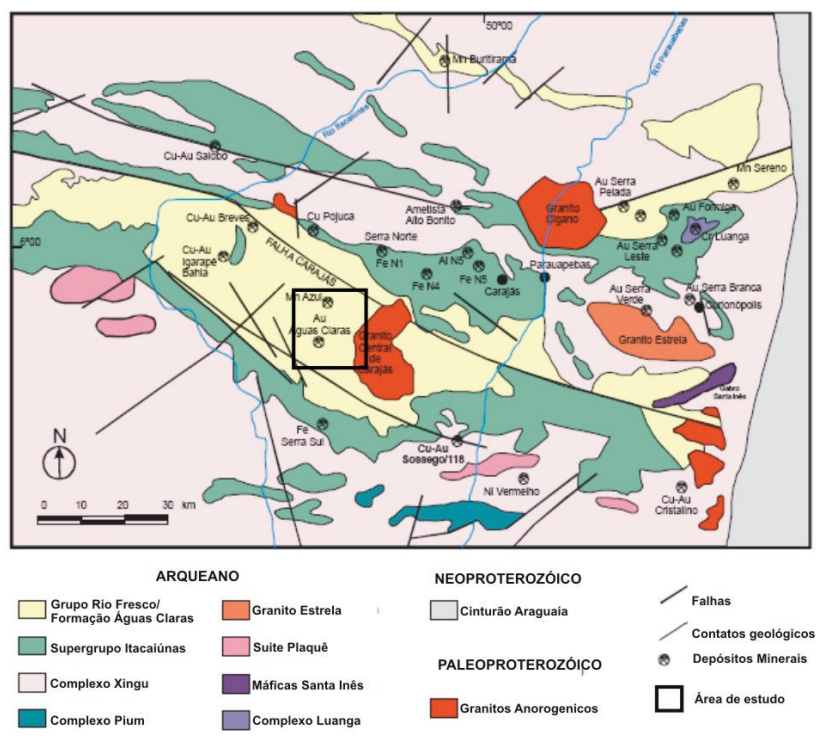


Figura 1. Distribuição das principais unidades geológicas e ocorrências minerais na região que inclui a Província Mineral de Carajás.

A importância do magmatismo granítico na Serra dos Carajás, do Arqueano ao Paleoproterozóico, está relacionada à metalogenia. Os depósitos de Cu ± Au de classe mundial, como Salobo e Sossego, têm sua gênese associada ao magmatismo ácido Arqueano (Botelho et al. 2005). O controle por grandes estruturas tectônicas e o hidrotermalismo associado ao magmatismo paleoproterozóico, em um contexto geológico favorável a remobilização e concentração dos minerais, foram os responsáveis pela formação de vários depósitos de Fe-Cu-Au na província de Carajás (Lindenmayier et al. 2005). Segundo Silva et al. (2005) a mineralização no depósito de Fe-Cu-Au de Igarapé Cinzento (Alvo GT46), formado a partir de fluidos de natureza magmático-hidrotermal de provável derivação granítica, é de idade paleoproterozóica (~1,8 Ga) e tectonicamente controlada por falhas e

fraturas NNE-SSW, situação que, provavelmente, compartilha com os depósitos Gamaleira e Sequeirinho (Mina do Sossego). Os depósitos de Cu-Au (W-Bi-Sn) de Águas Claras e Breves estão relacionados a um sistema hidrotermal geneticamente associado a granitogênese alcalina paleoproterozóica (Tallarico et al. 2004, Botelho et al. 2005).

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). No final do Proterozóico ocorreu um evento transpressivo rúptil, localmente transtensivo, 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.

3. Base de Dados & Métodos

A Tabela 1 especifica as imagens PALSAR utilizadas na pesquisa.

Tabela 1. Principais características das imagens PALSAR utilizadas. Fonte: Paradella et al. (2007).

Cena	Nível do produto	Modo	Resolução	Órbita	Data	Incidência
080153740	1,5	FBD	20 m	Desc.	27/07/2007	38,894°
080153750	1,5	FBD	20 m	Desc.	27/07/2007	38,894°
076437060	1,5	FBD	20 m	Asc.	02/07/2007	39,019°
083147050	1,5	FBD	20 m	Asc.	17/08/2007	39,017°

As imagens PALSAR foram corrigidas radiométrica (padrão de antena, *speckle*) e geometricamente (orto-retificação) para a integração digital com os dados aerogamaespectrométricos (canais U, Th, K e CT) de alta resolução (levantamento por helicóptero com altura de vôo de 60 m, com espaçamento de 250 m entre as linhas de amostragem e de 5 km entre as linhas de controle). Trabalhos anteriores (Paradella et al. 1997, 1998) demonstraram a eficiência da técnica de transformação IHS na integração de dados SAR e aerogamaespectrométricos. Utilizou-se a tabela de pseudo-cor de um canal individual (U, Th, K, CT) como entrada na transformação RGB-IHS, seguido pela substituição do canal intensidade (I) pelo radar, enquanto o canal matiz (H) permanece o mesmo e o canal saturação (S) é substituído por uma imagem sintética com valor constante, seguido pela transformação reversa IHS-RGB.

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 integradas aos dados aerogeofísicos (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. As variações de matiz associadas aos dados aerogamaespectrométricos permitiram inferir variações composicionais nos conjuntos litológicos superficiais.

4. Resultados

A Figura 2 mostra a integração digital RGB-IHS para a área de estudo, que apresenta a fusão da imagem PALSAR HH descendente (L-HHD) com os dados

aerogamaespectrométricos do canal contagem total (CT). Superpõe-se a interpretação geológica obtida a partir da imagem integrada e balizada pelos dados bibliográficos e observações de campo. O objetivo alcançado na interpretação dessa imagem integrada foi o de mapear as unidades litológicas regionais na região de Águas Claras, limítrofe com o Granito Central de Carajás, e identificar e caracterizar as relações entre as estruturas rúpteis que ocorrem na área. As diversas direções estruturais são controladas por um *trend* regional WNW-ESE a NW-SE.

Segundo modelos evolutivos propostos (Pinheiro 1997, Veneziani et al. 2004), o último grande evento deformacional que ocorreu na região no final do Proterozóico foi o responsável pelo arranjo do atual *trend* estrutural, com a formação dos grandes sistemas de falhas transcorrentes sinistras Carajás e Cinzento, de orientação WNW-ESSE. A criação de áreas transtensivas forneceu condições favoráveis para a intrusão dos granitos anorogênicos paleoproterozóicos, aos quais se associam importantes mineralizações de ouro e cobre (p. ex.: Águas Claras). A partir do modelo teórico-evolutivo de deformação rúptil que caracteriza a distribuição espacial das estruturas deste evento deformacional (Veneziani et al. 2004), Santos et al. (2007) identificaram as direções NW-SE(Y) e ENE-WSW(T) como as mais importantes na formação de estruturas transtensivas do tipo *rhombo-chasms* e, portanto, potencialmente favoráveis à migração de fluidos hidrotermais mineralizantes, na região próxima ao contato entre os sedimentos da Formação Águas Claras e o Granito Central.

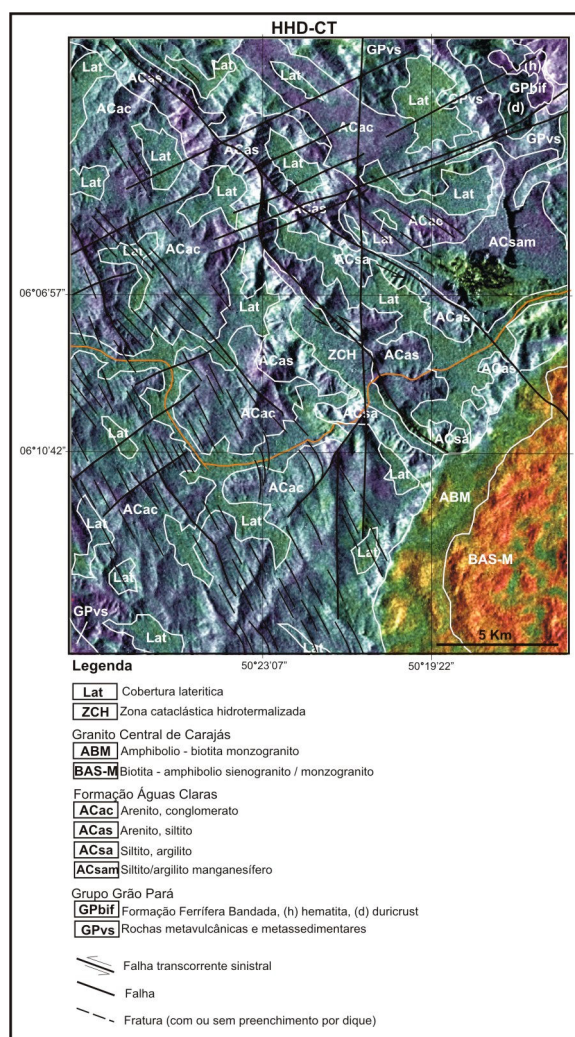


Figura 2. Interpretação geológica baseada na integração RGB-IHS da imagem PALSAR L-HH descendente com dados gamaespectrométricos contagem total (CT). Fonte: modificado de Paradella et al. (2007).

A Figura 3 é composta pelas imagens PALSAR L-HH ascendente e descendente (Fig. 3A) e L-HV ascendente e descendente (Fig. 3B). As estruturas T (ENE-WSW) e Y (NW-SE), de acordo com o modelo teórico-empírico de deformação rúptil (Fig. 3C), aparecem com diferentes níveis de realce nas imagens ascendentes e descendentes, enfatizando a importância do azimute de iluminação no realce das estruturas geológicas de interesse. As estruturas tratativas T são muito bem realçadas na imagem descendente (estruturas perpendiculares à iluminação) e totalmente suprimidas na ascendente (estruturas paralelas à iluminação). As estruturas Y, representadas por um intenso sistema de fraturas (preenchidas ou não por diques básicos) paralelo ao *trend* estrutural regional, são mais bem realçadas na imagem ascendente pela posição mais perpendicular em relação à iluminação do radar. As duas polarizações (L-HH e L-HV) apresentam um bom nível de realce das estruturas analisadas, com uma pequena vantagem para a L-HH, principalmente com relação às estruturas Y.

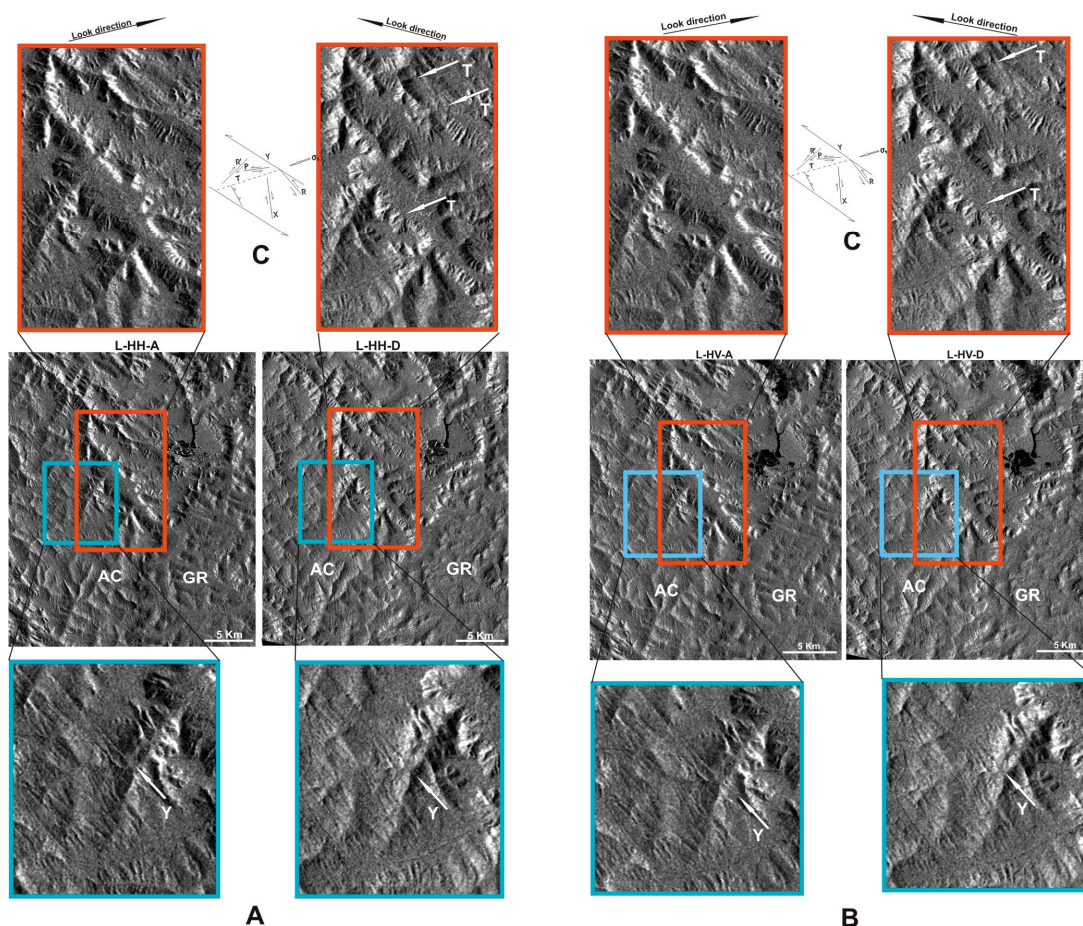


Figura 3. Imagens PALSAR L-HH ascendente e descendente (A) e L-HV ascendente e descendente (B) mostrando diferenças nos realces das estruturas T e Y do modelo teórico-empírico de deformação rúptil (C), de acordo com a variação da direção de iluminação do radar. AC = Formação Águas Claras, GR = Granito Central.

A Figura 4 contém as integrações digitais RGB-IHS das imagens PALSAR L-HH descendente (Fig. 4A) e ascendente (Fig. 4B) com o canal potássio (K) dos dados gamaespectrométricos da área de estudo. Os destaques indicam a mobilidade do elemento K

ao longo de fraturas Y e T nos sedimentos da Formação Águas Claras, próximos ao contato com o Granito Central. A mobilidade do potássio ao longo dessas estruturas sugere o desenvolvimento de atividades hidrotermais (percolação de fluidos) relacionadas a granitogênese alcalina paleoproterozóica, a qual se associam geneticamente os depósitos minerais de Au e Cu conhecidos na região de Águas Claras (Tallarico et al. 2004, Botelho et al. 2005). A identificação de estruturas transtensivas a partir de dados do sensor PALSAR e sua integração aos levantamentos aerogamaespectrométricos indicaram, pela primeira vez em uma imagem, os possíveis caminhos de percolação dos fluidos hidrotermais, contribuindo para o conhecimento sobre a formação dos depósitos minerais que ocorrem na região.

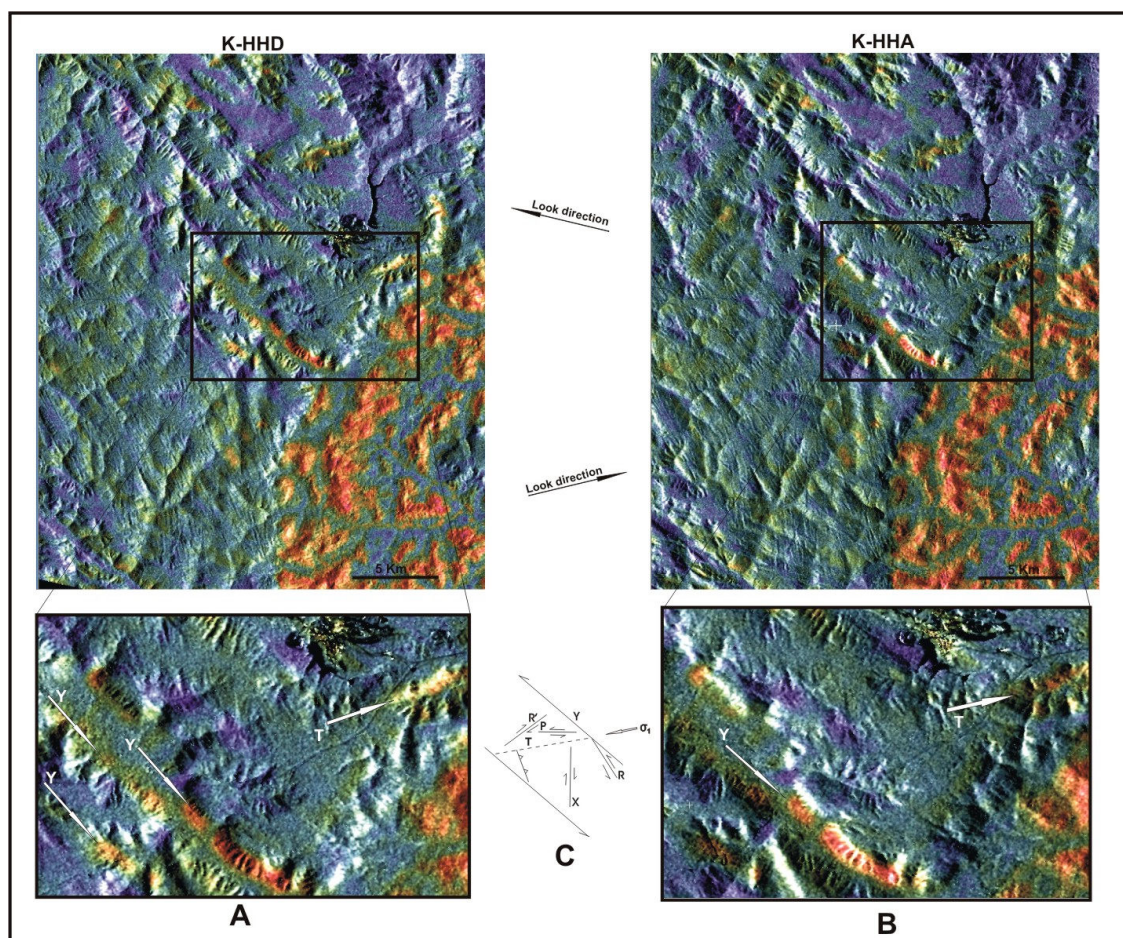


Figura 4. Integrações digitais RGB-IHS de imagens PALSAR L-HH descendente (A) e L-HH ascendente (B) com dados gamaespectrométricos no canal K. No destaque, a indicação da mobilidade do elemento K (matizes vermelho-alaranjadas) ao longo das estruturas Y e T do modelo teórico-empírico de deformação rúptil (C).

5. Conclusões

A versatilidade das imagens PALSAR ampliou a sua aplicabilidade nesse estudo geológico na região de Águas Claras, Província Mineral de Carajás. A utilização de dois azimutes de iluminação (órbitas ascendente e descendente) foi fundamental na caracterização das estruturas transtensivas Y e T. A resolução espacial fina e a ótima capacidade de realce da geometria superficial (macro- e micro-topografias) permitiram o detalhamento das estruturas rúpteis, fundamental para os objetivos do trabalho.

A integração digital pela técnica RGB-IHS dos dados PALSAR com levantamentos aerogamaespectrométricos de alta resolução, resultou em produtos de valor agregado com

grande aplicabilidade na atual pesquisa. Assim, as informações texturais da imagem PALSAR HH descendente, somadas às indicações sobre variações composicionais superficiais fornecidas pelo canal contagem total (CT) dos dados aerogamaespectrométricos possibilitaram um ótimo nível de detalhe na cartografia das unidades geológicas e na definição dos principais *trends* estruturais.

O resultado geológico mais significativo foi obtido com a integração RGB-IHS da imagem PALSAR HH (ascendente e descendente) com o canal K dos dados aerogamaespectrométricos. Obteve-se, pela primeira vez em uma imagem de sensoriamento remoto, indícios sobre os caminhos por onde se deu a percolação dos fluidos hidrotermais, que podem estar geneticamente relacionados aos depósitos de Au e Cu de Águas Claras.

Agradecimentos: os autores agradecem à Agência de Exploração Aeroespacial do Japão JAXA (RA # 219) pelas imagens PALSAR, à Vale pelos dados aerogeofísicos e ao CNPq, pelos recursos de projeto de pesquisa do segundo autor (bolsa P&D, processo 300985/90-8).

Referências Bibliográficas

Avelar, V. G. **Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão, do magmatismo da região de Tucumã, SE do Estado do Pará, Amazônia oriental.** 1996. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém.

Araújo, O.J.B.; Maia, R.G.N. **Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A. Relatório Final.** CPRM, Rio de Janeiro, 1991, 136p.

Botelho, N.F.; Moura, M.A.; Teixeira, L.M.; Olivo, G.R.; Cunha, L.M.; Santana, M.U. Caracterização geológica e metalogenética do depósito de Cu ± (Au, W, Mo, Sn) Breves, Carajás. In: Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. **Capítulo VI, CD-ROM.** DNPM, CT-Mineral / FINEP, ADIMB, 1, 339-389, 2006.

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.; Oliveira, M.A.; Almeida, J.A.C.; Althoff, F.J.; Leite, A.A.S.; Oliveira, D.C.; Barros, C.E.M. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. In: Dall'Agnol, R., Rosa-Costa, L.T., Klein, E.L. (Eds.) **Abstract volume and field trip guide.** 2006, p. 97-150.

Lindenmayer, Z. G.; Fleck, A.; Gomes, C.H.; Santos, A.B.S.; Caron, R.; Paula, F.C.; Laux, J.H.; Pimentel, M.M.; Sardinha, A.S. Caracterização geológica do alvo estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará In: **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia.** DNPM, CT-Mineral / FINEP, ADIMB, CD-ROM, 2005, cap. IV, 1, 137-205.

Machado, N.; Lindenmayer, Z.; Knough, T.E.; Lindenmayer, D. U-Pb Geochronology of Archean Magmatism and Basement Reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. **Precambrian Research**, 49:329-354, 1991.

Nogueira, A. C. R. ; Truckenbrodt, W. ; Pinheiro, R. V. L. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: Redescrição e Redefinição Litoestratigráfica. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Belém, 7, 177-197, 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.

Paradella, W.R.; Veneziani, P.; Bignelli, P.A.; Pietsch, R.W.; Toutin T. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 18, 1483-1501, 1997.

Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Dall'Agnol, R.; Pietsch, R.W.; Sant'Anna, M.V. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás granite area, Brazil. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 24, 376-392, 1998.

Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Oliveira, C.G.; Silva, A.Q.; Freitas, C.C. Development of Geoscience Applications with PALSAR Data in the Tropical Environments of Brazil (Interim Report). In: The First Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program in Kyoto, 2007, Kyoto. **Proceedings**. Tóquio: Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2007. v. GLG05. p. 1-4.

Pidgeon, R.T.; Macambira, M.J.B.; Lafon, J.M. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chem. Geol.**, 166, 159-171, 2000.

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.

Santos, A.R.; Veneziani, P. (*in memoriam*); Paradella, W.R. 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. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 2171-2178, CD-ROM, on line. Disponível em <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.16.42/doc/2171-2178.pdf>. Acesso em: 06-11-2008.

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).

Silva, M.G.; Teixeira, J.B.G.; Pimentel, M.M.; Vasconcelos, P.M.; Arielo, A., Franca Rocha W.J.S. 2005. Geologia e Mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento), Carajás. In: Marini, O.J.; Queiroz, E.T.; Ramos, B.W. (eds.) **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia**. DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, Capítulo III, p. 93-151.

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.; 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).

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.