

# Mapeamento geológico na região da Província Mineral do Tapajós (PA) com base em dados dos sensores SAR das plataformas R99-B/SIPAM, RADARSAT-1 e JERS-1

Thais Andressa Carrino<sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG  
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas-SP, Brasil  
{thais.carrino, beto}@ige.unicamp.br

**Abstract.** This study comprises the comparison of three distinct SAR sensors carried on board of airborne (R99-B/SIPAM) and orbital (RADARSAT-1 and JERS-1) platforms, aiming to evaluate their potential benefits and limitations in geologic mapping applications within the Tapajós Mineral Province (Amazon forest).

**Palavras-chave:** geologic mapping, Synthetic Aperture Radar, Tapajós Mineral Province, mapeamento geológico, radar de abertura sintética, Província Mineral do Tapajós.

## 1. Introdução

A Província Mineral do Tapajós (PMT), localizada em partes dos Estados do Amazonas e do Pará, possui importância estratégica quando analisados os diversos tipos de ocorrências minerais, em especial, as mineralizações auríferas em depósitos do tipo *placer* e, mais recentemente, aquelas exploradas em depósitos primários.

O segmento da PMT abrangido neste estudo, com área em torno de 3.200 km<sup>2</sup>, está localizado na porção sudoeste do Estado do Pará (PA), próximo à região limítrofe com os Estados do Amazonas e do Mato Grosso (**Figura 1 (a)**). É caracterizado por densa cobertura vegetal (Floresta Amazônica) e dificuldades de acesso, o que favorece o uso de sensoriamento remoto por radar visando à extração de informações texturais e estruturais, de interesse para o mapeamento geológico.

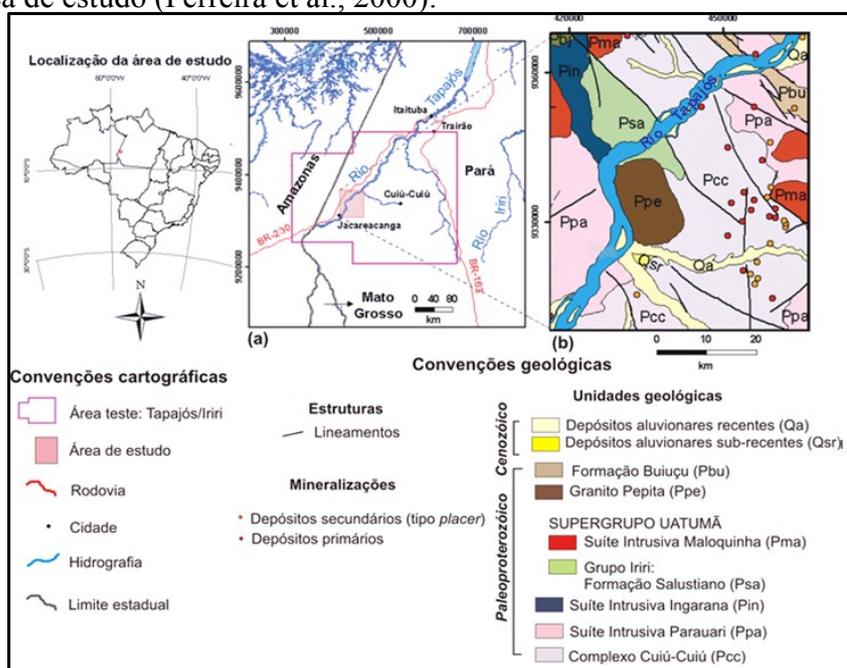
As vantagens do emprego de imagens de radar de abertura sintética (SAR) para regiões como esta envolvem (i) a aquisição de imagens em condições atmosféricas adversas (na presença de nuvens, brumas etc); (ii) a distinção mais apurada da morfologia dos terrenos imageados e da rugosidade dos mesmos; (iii) dados SAR, em especial aqueles de comprimento de ondas mais longos, favorecem uma maior penetração na cobertura vegetal (Paradella, 1996; Drury, 2001).

O sistema SAR-R99-B do SIPAM, atualmente em plena operação, tem um grande potencial para contribuir em pesquisas geológicas na região Amazônica, juntamente com outros dados SAR a bordo de plataformas orbitais, caso do RADARSAT-1 e do JERS-1. Entretanto, nenhum estudo ainda foi realizado no sentido de comparar os dados produzidos por esses sensores. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é a investigação das potencialidades comparativas destes três sistemas SAR para o mapeamento geológico de uma área na PMT, caracterizada por uma geologia complexa, resultado de eventos tectono-magmáticos e metamórficos superpostos, datados pelo menos desde o Paleoproterozóico.

## 2. Contexto geológico

A área de estudo está inserida na porção central do Cráton Amazônico (CA), inclusa no segmento meridional da Província Ventuari-Tapajós (PVT). A evolução desta região é associada à formação de um núcleo continental Paleoproterozóico, submetido a processos de acreção e encurtamento crustal. Esta área é correlata ao período de maior evento de acreção de crosta juvenil do CA (2,5-1,8 Ga) (Tassinari et al., 2000).

O mapa geológico na **Figura 1 (b)** apresenta as unidades geológicas que caracterizam a área de estudo (Ferreira et al., 2000):



**Figura 1. (a)** Localização da área de estudo e **(b)** inserção da mesma no contexto geológico da PMT (modificado de Faraco et al., 1997; Ferreira et al., 2000; CPRM, 2004). Mineralizações do tipo *placer* **(b)** são correlatas às áreas de garimpo da região.

**-Unidades Paleoproterozóicas:** representadas pelo Grupo Jacareacanga (seqüências metavulcano-sedimentares); Complexo Cuiú-Cuiú (rochas gnáissicas ortoderivadas em associação à granitóides pouco deformados); Suíte Intrusiva Parauari (corpos batolíticos); Suíte Intrusiva Ingarana (constituída por diabásios); Formação Bom Jardim (rochas vulcânicas de composição intermediária); Supergrupo Uatumã, abarcando o Grupo Iriri e a Suíte Intrusiva Maloquinha (associações vulcano-plutônicas); Granito Pepita (riebeckita-arfverdsonita granito e feldspato alcalino granito); Formação Buiúçu (rochas sedimentares).

**-Unidades Cenozóicas:** compreendem as Coberturas detriticas e lateríticas e os Depósitos aluvionares sub-recentes e recentes (areias inconsolidadas).

As principais feições estruturais da PMT correspondem ao *Sistema de Falhas Transcorrentes do Tapajós*, representado por megalineamentos de orientação NW-SE e sentido predominantemente sinistral, além de lineamentos que seguem o *trend* NE-SW, transpostos pelos primeiros (Ferreira et al., 2000; Almeida et al., 2001). O *trend* regional NW-SE controla a disposição de corpos graníticos portadores de mineralizações primárias (Martini, 1998).

### 3. Materiais

Foram utilizados, nesse estudo comparativo, dados dos sensores SAR das plataformas JERS-1, RADARSAT-1 e R99-B/SIPAM (**Tabela 1**). Os dados da plataforma JERS-1 (4 cenas de 09/11/1993 e 22/12/1993) foram obtidos com nível de processamento 2.1–NASDA Standard Process. Os dados do RADARSAT-1 (1 cena) foram obtidos no modo *Fine Beam Mode* (F2). Os dados do SIPAM compreendem 3 faixas imageadas em 19/03/2005 (**Figura 1 (a)**).

Como dado auxiliar foi utilizado a aerogamaespectrometria obtida, em 1997, no âmbito do *Projeto Aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós – Bloco I* da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). O levantamento aéreo é caracterizado por direção N-S, espaçamento das linhas de controle e de vôo de 13 km e 1 km, respectivamente, e altura de vôo de 100 metros.

**Tabela 1.** Características principais dos sensores SAR utilizados no estudo comparativo (Drury, 2001; Souza Filho, 2004):

Plataforma/Sensor	Banda	Ângulo de visada	Polarização	Resolução espacial	Iluminação
<i>R99-B/SIPAM/SAR</i>	L ( $\lambda= 23,4$ cm)	63°-80° ( <i>near-far range</i> )	HH, VH	6 m	Para leste
<i>RADARSAT-1/SAR</i>	C ( $\lambda= 5,6$ cm)	39 -42°	HH	10 m	Para W-NW
<i>JERS-1/SAR</i>	L ( $\lambda= 23,5$ cm)	35° 21'	HH	18 m	Para oeste (órb. ascendente)

#### 4. Pré-processamento e processamento de dados aerogeofísicos e SAR

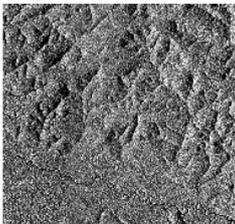
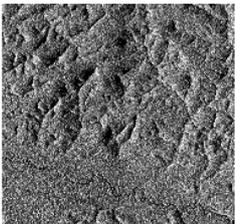
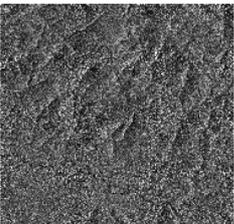
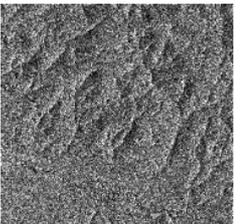
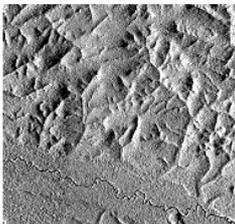
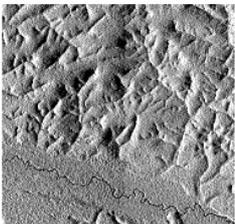
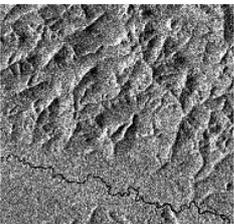
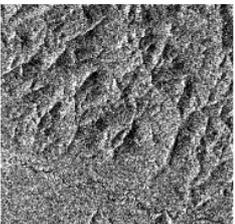
As etapas do trabalho compreenderam pré-processamento, processamento e interpretação individual e integrada dos dados aerogamaespectrométricos e dados SAR.

Os dados aerogamaespectrométricos foram avaliados quanto a distribuição espacial das linhas de vôo para posterior micronivelamento pelo método bi-direcional de linhas (Geosoft, 2001), com a finalidade de redução de erros residuais de nivelamento dos dados originais. Malhas regulares com células de 200 metros foram geradas a partir da base original, produzindo o mapa de contagem total, visando à discriminação de litotipos da área de estudo.

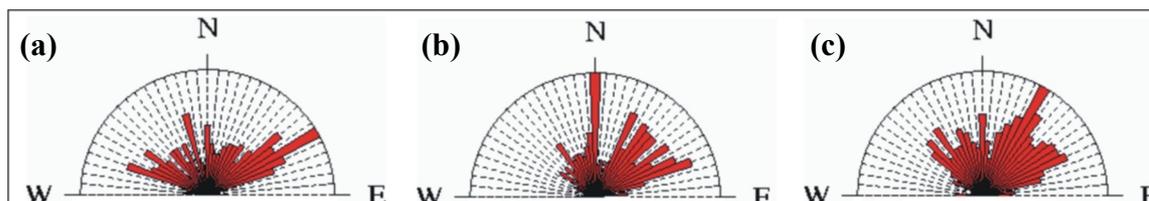
Os dados SAR foram submetidos às seguintes etapas de pré-processamento: **(i)** correção geométrica, **(ii)** correção radiométrica. O conjunto de dados SAR foram retificados a partir de imagem TM/Landsat 5 (ponto/órbita 229/064), considerando-se pelo menos 20 pontos de controle no terreno. O erro médio quadrático (*RMS*) foi inferior a 7 metros em todos os casos, quase insignificante para os dados R99-B/SIPAM, mais precisos espacialmente. Estes dados foram corrigidos ao sistema de projeção UTM e datum SAD-69, zona 21 sul. As resoluções espaciais originais dos dados SAR individuais foram mantidas. Por fim, a correção radiométrica foi realizada visando a supressão do ruído *speckle*. Os seguintes filtros foram experimentados: gama 7x7 pixels, para as imagens nas polarizações HH e VH do R99-B/SIPAM; mediana 5x5 pixels e 3x3 pixels para os sensores SAR das plataformas RADARSAT-1 e JERS-1, respectivamente (**Figura 3**).

O processamento e interpretação dos dados SAR envolveram as seguintes etapas: **(i)** análise estrutural, **(ii)** análise textural, **(iii)** integração com aerogeofísica. A análise estrutural foi concebida pela delimitação de lineamentos tratados como traços estruturais com característica linear, considerando a definição de O'Leary et al. (1976). As formas de relevo e drenagem condicionados, parâmetros topográficos acentuados em imagens SAR, foram fotointerpretadas para o R99-B/SIPAM, RADARSAT-1 e JERS-1. Rosetas azimutais foram geradas como representação da direção preferencial dos lineamentos de caráter regional na área de estudo (**Figura 4**). A análise textural dos dados SAR foi empreendida com a finalidade de discriminação litológico-estrutural da área de estudo. As texturas, compreendendo as distribuições tonais dos níveis de cinza da imagem, foram analisadas visualmente nas imagens SAR pré-processadas. As interpretações e descrições dos corpos geológicos característicos da área são apresentadas na **Figura 5** e **Tabela 2**. O poder de penetração e a qualidade dos SAR das plataformas R99-B/SIPAM, RADARSAT-1 e JERS-1, na distinção de alvos geológicos na área de estudo, densamente florestada, podem ser observados nas diferentes imagens quanto à maior ou menor facilidade de reconhecimento das principais unidades geológicas (**Figuras 3** e **5**). A integração de dados SAR com dados gamaespectrométricos proporcionou a fusão de informações topográficas e texturais com dados radiométricos da contagem total, permitindo melhor definição dos corpos geológicos da área de estudo. Com a Transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), o procedimento adotado envolveu a substituição do componente **I** pela imagem SAR, enquanto os parâmetros **H** e **S** foram associados ao dado aerogamaespectrométrico (contagem total). O resultado da

fusão das imagens SAR/Contagem Total é apresentado na **Figura 6**, com sobreposições dos corpos geológicos interpretados. As relações das respostas texturais/radiométricas interpretadas nesta etapa são apresentadas na **Tabela 2**.

	R99-B/SIPAM: POLARIZAÇÃO HH	R99-B/SIPAM: POLARIZAÇÃO VH	RADARSAT-1/SAR: FINE BEAM MODE (F2)	JERS-1/SAR: NASDA STANDARD PROCESS
(a) Dados originais				
(b) Dados filtrados: supressão de <i>speckle</i>	 (gama 7x7)	 (gama 7x7)	 (mediana 5x5)	 (mediana 3x3)

**Figura 3.** Resultados das filtragens para redução de *speckle* das imagens SAR utilizadas.



**Figura 4.** Rosetas azimutais derivadas da interpretação de lineamentos para cada imagem SAR estudada: (a) SAR-R99-B/SIPAM (382 lineamentos), (b) RADARSAT-1 (378 lineamentos) e (c) JERS-1 (376 lineamentos).

## 5. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos permitiram algumas considerações importantes quanto à aplicação de sensoriamento remoto ativo para mapeamento geológico em regiões densamente florestadas, como é o caso da área de estudo:

(1) Os dados SAR, particularmente aqueles gerados pelo R99-B/SIPAM, podem ser utilizados vantajosamente, em relação a dados multiespectrais (e.g., Landsat), considerando a sua melhor penetrabilidade na cobertura, principalmente em regiões densamente florestadas, típicas da Amazônia. Estes dados permitem o realce de texturas e estruturas que são pouco identificáveis em dados produzidos por sensores ópticos.

(2) Os dados originais dos sensores SAR e os dados pré-processados com filtragem para redução de *speckle* (**Figura 3**) mostram relações sinal/ruído distintas. A imagem R99-B/SIPAM apresentou maior redução de *speckle* enquanto os dados do RADARSAT-1 e, principalmente do JERS-1, mantiveram uma considerável quantidade de ruído após a filtragem.

(3) A análise de lineamentos traçados a partir das três imagens SAR e interpretados nas rosetas azimutais geradas (**Figura 4**), possibilitaram a verificação, em termos gerais, de realce de estruturas com direção NNE-SSW e, mais subordinadamente, NNW-SSE, que, por sua vez, corroboram com o contexto geológico regional. Diferenças nos padrões NNE-SSW e NNW-SSE são assumidas em decorrência do modo de obtenção da imagem (geometria de

imageamento), quanto à iluminação (Carraro & Mexias, 2005) (**Tabela 1**), além da qualidade de cada imagem. O produto derivado do sistema SAR-R99-B do SIPAM apresentou o melhor realce de estruturas NNW dentre todos os sistemas SAR testados, além de demarcar bem estruturas de direção N60E. Este fato pode estar relacionado à melhor razão sinal/ruído apresentada em comparação ao RADARSAT-1 e JERS-1, além de maior resolução espacial, o que conjuntamente, interferem na qualidade da imagem e, conseqüentemente, na extração de lineamentos. As diferenças obtidas são também dependentes do sombreamento, que por sua vez é definido pelo ângulo de visada do sistema radar (Carraro & Mexias, 2005). Dados da plataforma R99-B/SIPAM foram adquiridos sob maior ângulo (**Tabela 1**), implicando em maior grau de sombreamento e melhor realce dos lineamentos na imagem. Entretanto, o padrão próximo a N60E também foi derivado da interpretação de estruturas lineares na imagem do RADARSAT-1, além de forte tendência N-S. O resultado obtido com o JERS-1 é mais similar ao do RADARSAT-1 (ambos com ângulos de incidência similares), diferindo dos demais por realçar estruturas N30E, principalmente.

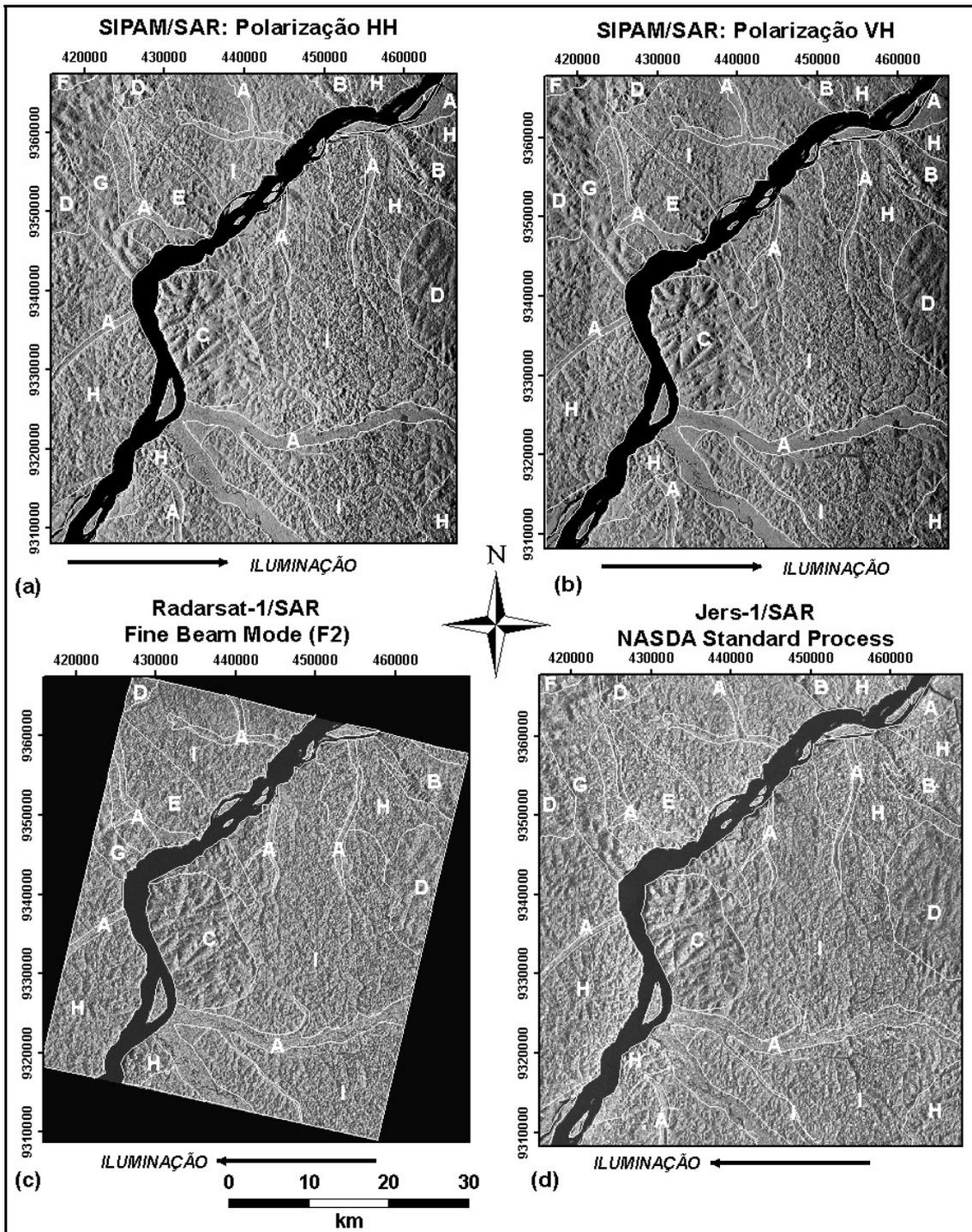
**Tabela 2.** Associação das diferentes unidades litológicas da área de estudo com as respectivas respostas texturais e radiométricas

<i>Unidades litológicas</i>	<b>Resposta textural</b>	<b>Resposta dos valores radiométricos</b>
<b>A</b> <i>Depósitos aluvionares sub-recentes (Qsr) e recentes (Qa)</i>	Textura lisa associada a áreas de aluviões.	Alta
<b>B</b> <i>Formação Buiúçu (Pbu)</i>	Cristas alongadas de topo plano, drenagem incisiva.	-
<b>C</b> <i>Granito Pepita (Ppe)</i>	Feição de maior rugosidade da área estudada (colinoso e acidentado), dissecado por drenagens e estruturas radiais.	Média à alta
<b>D</b> <i>Suíte Intrusiva Maloquinha (Pm)</i>	Morfologia acidentada havendo regiões, entretanto, em que tais padrões não são perceptíveis, dificultando a distinção com relação à Suíte Intrusiva Parauari.	Alta
<b>E</b> <i>Formação Salustiano (Psa)</i>	Drenagem dendrítica e disposição alongada NW-SE do corpo.	Alta
<b>F</b> <i>Formação Bom Jardim (Pbj)</i>	Corpo na área de estudo colinoso e não muito bem distinguível com a Suíte Intrusiva Ingarana (Pin).	Baixa
<b>G</b> <i>Suíte Intrusiva Ingarana (Pin)</i>	Corpos levemente alongados na direção E-W.	Baixa à média
<b>H</b> <i>Suíte Intrusiva Parauari (Ppa)</i>	O relevo é ondulado e o padrão da drenagem é dendrítico denso. A textura se aproxima à do Complexo Cuiú-Cuiú.	Alta
<b>I</b> <i>Complexo Cuiú-Cuiú (Pcc)</i>	Relevo dissecado e drenagem dendrítica densa.	Média a alta

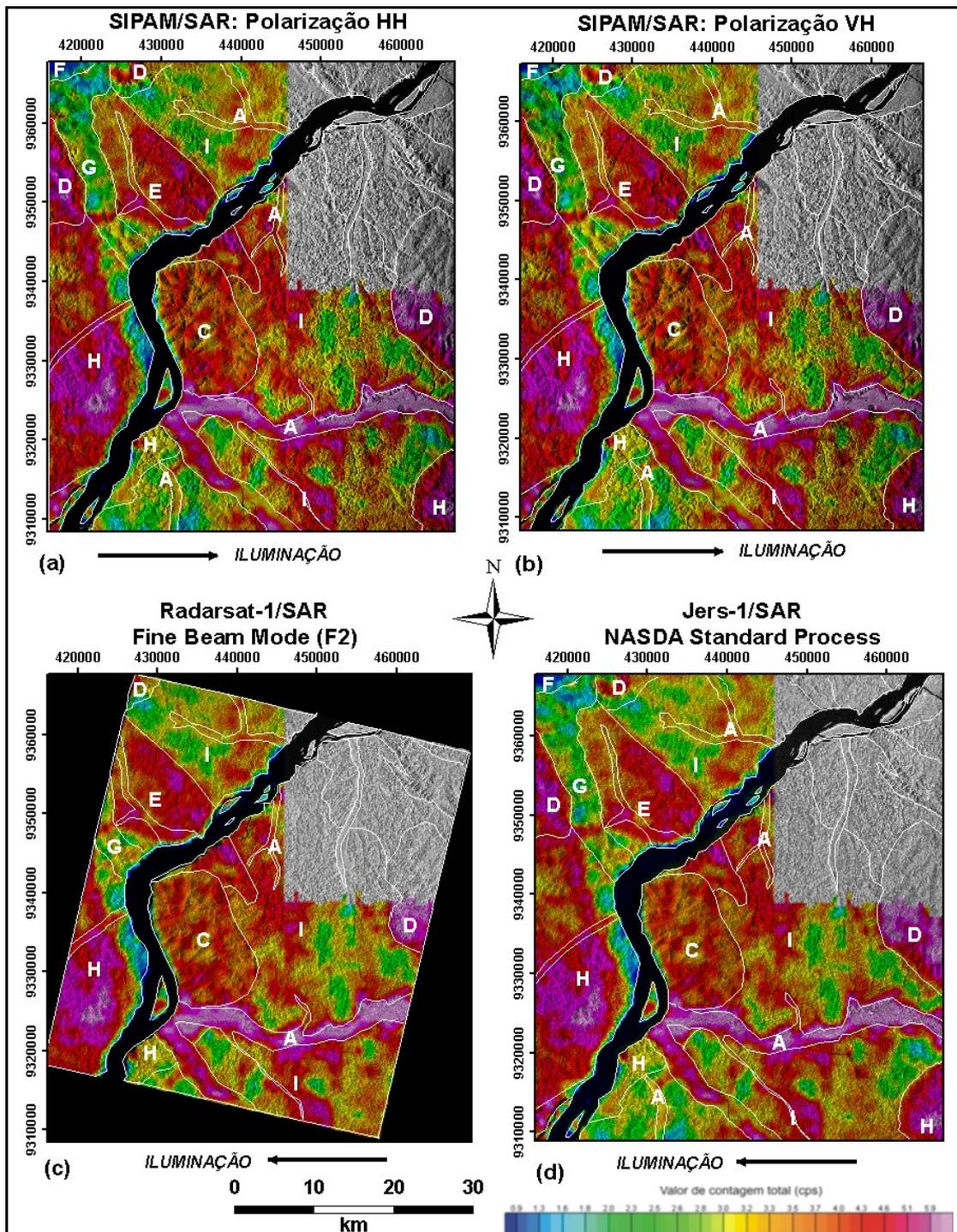
(4) A banda L do SIPAM proporcionou o maior grau de penetrabilidade dentre todos os sensores SAR analisados, permitindo uma distinção mais apurada das unidades geológicas locais. Além desta qualidade, apresenta a melhor resolução espacial original, de 6 metros, sendo possível a aplicação de filtros com janelas móveis maiores (e.g., 7x7), sem que esta operação afete consideravelmente a resolução espacial. Este resultado difere daquele obtido pelo JERS-1/SAR, que também utiliza a banda L, mas que não ofereceu resultados similares ou mesmo superiores ao do sistema SAR-R99-B do SIPAM, mantendo uma quantidade de *speckle* ainda considerável após a filtragem (**Figura 3**). A banda C (~5,6 cm), utilizada na plataforma RADARSAT-1/SAR, é caracterizada por uma penetração do sinal que fica retida no topo do dossel da floresta, enquanto a energia decorrente dos pulsos da banda L (~23 cm) interage com a copa das árvores e com a interface vegetação/terreno. Desta forma, as feições mais destacadas e identificadas em banda L (contrastes litológicos e ocupações por garimpos)

são homogêneas em tons de cinza pelos sensores em banda C, implicando em pouco contraste na imagem (**Figura 5**).

(5) O produto integrado SAR/Contagem Total (**Figura 6**) resultou em um produto ótimo para fins de mapeamento geológico regional. A complementaridade de diferentes dados para mapeamento geológico é evidenciada pelas diferentes respostas interpretadas e expostas na **Tabela 2** para as principais unidades geológicas da área de estudo.



**Figura 5.** Produtos SAR das plataformas R99-B/SIPAM ((a), (b)), RADARSAT-1 (c) e JERS-1 (d), sobrepostos aos limites de unidades interpretadas: **A** – Depósitos quaternários; **B** – Formação Buiçu; **C** – Granito Pepita; **D** – Suíte Intrusiva Maloquinha; **E** – Formação Salustiano (Grupo Iri); **F** – Formação Bom Jardim; **G** – Suíte Intrusiva Ingarana; **H** – Suíte Intrusiva Parauari; **I** – Complexo Cuiú-Cuiú.



**Figura 6.** Produtos integrados SAR/Contagem Total, com sobreposição dos limites de unidades interpretados: A – Depósitos recentes e sub-recentes; C – Granito Pepita; D – Suíte Intrusiva Maloquinha; E – Formação Salustiano (Grupo Iriri); F – Formação Bom Jardim; G – Suíte Intrusiva Ingarana; H – Suíte Intrusiva Parauari; I – Complexo Cuiú-Cuiú.

(6) Outra vantagem do sistema imageador SAR-R99-B do SIPAM é a possibilidade de multipolarização frente aos dados do RADARSAT-1/SAR e JERS-1/SAR, ambos com polarização única HH. As polarizações HH e VH do SIPAM proporcionam diferenças nas respostas texturais e tonais das imagens, com aquisição de informações em diferentes modos de transmissão e recepção da energia retrospalhada.

## 7. Conclusões

O estudo comparativo dos dados SAR das plataformas R99-B/SIPAM, RADARSAT-1 e JERS-1 mostrou a superioridade dos dados do SAR/SIPAM para aplicações geológicas neste estudo de caso. A alta resolução espacial, possibilidade de multipolarização, alta razão sinal/ruído, entre outros aspectos, representam ganhos de qualidade expressivos em comparação aos sensores orbitais abordados, permitindo a identificação visual de diferentes texturas associadas a corpos geológicos na região de estudo. Os dados dos três sistemas SAR utilizados na extração de feições lineares são complementares entre si, possibilitando o realce de estruturas em dependência das diferentes geometrias de aquisição. Além disso, a integração de dados SAR com dados complementares, como aerogeofísica, é uma ferramenta essencial no detalhamento geológico, provendo a fusão de informações topográficas (SAR) com dados que possibilitam a discriminação de rochas (e.g., aerogeofísica), em áreas densamente florestadas. Além da superioridade técnica dos dados do sistema SAR-R99-B do SIPAM, o fato de ser um sensor disponível no país e com custos operacionais relativamente baixos, abre uma excelente perspectiva para novas investigações de caráter geológico na região Amazônica, com resultados compatíveis aos atingidos no caso deste estudo realizado num segmento da Província Mineral do Tapajós.

## Referências

- Almeida, M.E.; Ferreira, A.L.; Brito, M.F.L.; Monteiro, M. A. S. Evolução tectono-estrutural da Província Tapajós com base na geologia das Folhas Vila Mamãe Anã e Jacareacanga (1:250.000), região limítrofe dos Estados do Amazonas e Pará. In: Reis N. J. & Monteiro M. A S (Coord.) **Contribuições à geologia da Amazônia**. Manaus, SBG-Núcleo Norte, n. 2, p. 57-114, 2001.
- Carraro, C. C.; Mexias, A. S. Imagens de sensoriamento remoto no mapeamento de lineamentos do Centro do Escudo Sul-Rio Grandense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 1757-1764. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.11.09/doc/1757.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2006.
- CPRM, 2004. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**. Folha SB.21 (Tapajós).
- Dardenne, M. A. & Schobbenhaus, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília-DF, Ed. UnB, 2001, p. 78-83.
- Drury, S. A. **Image interpretation in geology**. 3 ed., Inglaterra, Blackwell Science, 2001, 290 p.
- Faraco, M. T. L.; Carvalho, J. M. A.; Klein, E. L. Carta metalogenética da Província Aurífera do Tapajós. In: Costa M. L. & Angélica R. S. (Coord.) **Contribuições à geologia da Amazônia**. Belém, v. 1, p. 423-437, 1997.
- Ferreira, A L.; Almeida, M. E.; Brito, M. F. L.; Monteiro, M. S. A. (Orgs.). **Projeto Especial Província Mineral do Tapajós (PROMIN-TAPAJÓS). Geologia e recursos minerais da Folha Jacareacanga (SB.21-Y-B), Estados do Amazonas e Pará**. Escala 1:250.000. Manaus, CPRM, 2000, 60 p.
- GEOSOFT. **Geosoft technical note: microlevelling using bi-directional gridding**, 2001.
- Martini, S. L. An overview of main auriferous regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 3, p. 307-314, 1997.
- O'Leary, D. W.; Friedman, J. D.; Pohn, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, v. 87, p. 1463-1469, 1976.
- Paradella, W. R. Imagens de radar. Fundamentação e experiência com o SAR na Amazônia. **FATOR GIS**, v. 14, p. 40-43, 1996.
- Souza Filho, C. R. Sensores hiperespectrais a bordo do SIVAM. **InfoGEO**, v. 30, p. 54-58, 2004.
- Tassinari, C.C. G.; Bettencourt, J. S.; Geraldés, M. C.; Macambira, M. J. B.; Lafon, J. M. The Amazonian Craton. In: Cordani U. G., Thomaz Filho A., Campos D. A. (eds.) **Tectonic evolution of South America**, Rio de Janeiro-RJ, p. 41-95, 2000.