

A ESTEREOSCOPIA COM IMAGENS RADARSAT-1: UMA AVALIAÇÃO GEOLÓGICA NA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

ATHOS RIBEIRO DOS SANTOS, WALDIR RENATO PARADELLA, PAULO VENEZIANI & MARIA CAROLINA DE MORAIS

ABSTRACT THE STEREOSCOPY WITH RADARSAT-1 IMAGES: A GEOLOGICAL EVALUATION IN THE CARAJÁS MINERAL PROVINCE This paper discusses the concept of SAR stereoscopy and related aspects. Different from optical stereoscopy, a balance has to be achieved between geometric disparity (parallax) and radiometric similarity (stereo viewability) when dealing with SAR stereoscopy. Several authors still discuss the stereo radar depth perception under specific conditions of terrain relief and stereo configuration. Results from RADARSAT-1 standard images are presented for the Carajás Mineral Province based on the analysis of six stereo pairs collected under distinct beam positions (S5, S6, S7) and illumination azimuth angles (78 and 282°). The geological performance of the stereo pairs was evaluated as a function of distinct types of terrain relief/geology. The results of this research have shown that an effective applicability of the radar stereoscopy is obtained only when aspects of the SAR stereo background and the photointerpreter's experience are taken into account.

Keywords: geologic remote sensing, radar stereoscopy, RADARSAT-1, Carajás Mineral Province.

RESUMO Este trabalho discute os conceitos relacionados à estereoscopia de radar e os aspectos que a influenciam. Diferentemente da estereoscopia óptica, a de radar necessita que se busque um equilíbrio entre as diferenças geométricas (paralaxes) e as similaridades radiométricas (visibilidade estereoscópica) das cenas do par. Alguns autores ainda discutem o nível de aplicabilidade da estereoscopia de radar, devido às dificuldades de percepção de profundidade, sob certas condições de relevo do terreno e de geometria de iluminação das cenas do par. São apresentados os resultados obtidos na região da Província Mineral de Carajás, através da análise de seis pares estereoscópicos, formados por imagens RADARSAT-1, em diferentes modos Standard (S5, S6 e S7) e azimutes de iluminação (78 e 282°). Os pares foram avaliados em diferentes tipos de relevo/geologia. Os resultados demonstraram a efetiva contribuição e aplicabilidade da estereoscopia de radar, quando são considerados aspectos que a influenciam e a experiência do intérprete neste tipo de abordagem.

Palavras-chave: sensoriamento remoto geológico, estereoscopia de radar, RADARSAT-1, Província Mineral de Carajás

INTRODUÇÃO O sistema SAR (*Synthetic Aperture Radar*) orbital do satélite canadense RADARSAT-1 permite observar uma mesma área de 35 diferentes modos, através da variação de seus ângulos de incidência (10 a 59°), de suas diferentes resoluções espaciais (10 a 100 m.) e áreas de cobertura (50x50 a 500x500 Km.). Além disso, é possível alterar a direção de visada através de órbitas ascendente ou descendente (respectivamente, 78 e 282° de azimutes nas latitudes equatoriais). Essa formidável gama de opções torna esses produtos ideais para a visão estereoscópica, uma ferramenta essencial em estudos geológicos. O entendimento dos conceitos nos quais se baseia a estereoscopia de radar, as implicações na sua performance, causadas pelas características da área a ser estudada, pelas variações dos ângulos de interseção estereoscópica, pelos azimutes de iluminação, pelos ângulos de interseção entre as duas órbitas e; as limitações e vantagens da estereoscopia com relação à visão monoscópica de radar são objetivos deste estudo, que tem como área teste a região da Província Mineral de Carajás, na Amazônia brasileira.

O radar de abertura sintética tem, historicamente, desempenhado um papel fundamental na ampliação do conhecimento geológico da região Amazônica, a partir da implantação do Projeto RADAM, no início dos anos setenta (Silva *et al.* 1974). Uma versão mais moderna deste tipo de SAR foi usada pela DOCEGEO, no recobrimento da Província Mineral de Carajás, em 1992 (Graham & Moretsohn 1997). Da mesma forma, em abril de 1992, foi desenvolvido um extenso aerolevantamento de dados SAR na Amazônia, dentro do Experimento SAREX (*South American Radar Experiment-SAREX' 92*), com o objetivo de simular os dados a serem obtidos com os satélites RADARSAT-1 e ERS-2, então com lançamentos previstos (Paradella *et al.* 1994, Paradella *et al.* 1997). A partir de novembro de 1995, com o lançamento do satélite RADARSAT-1, uma nova e diversificada fonte de dados SAR tornou-se disponível para aplicações geoambientais. Detalhes sobre este sistema podem ser encontrados em RADARSAT Internacional (1995).

CONTEXTO GEOLÓGICO A Província Mineral de Carajás constituiu uma das mais importantes reservas minerais do Brasil, com os maiores depósitos de ferro do mundo, além de importantes mineralizações em ouro, cobre, manganês e níquel. Ela integra a Plataforma Brasileira, na porção sudeste do Craton Amazônico, que se tomou estável antes do final do Pré-Cambriano (Almeida *et al.* 1981). Devido à sua complexidade geológica e ao nível de conhecimento restrito, o modelo de evolução tectônica da região é, ainda hoje, controverso.

Baseados em dados geocronológicos, Cordani & Brito Neves (1982) e Teixeira *et al.* (1989) propuseram para a área um modelo tectônico caracterizado por cinturões móveis proterozóicos, ao redor de um núcleo cratônico arqueano. Os granulitos e migmatitos a norte

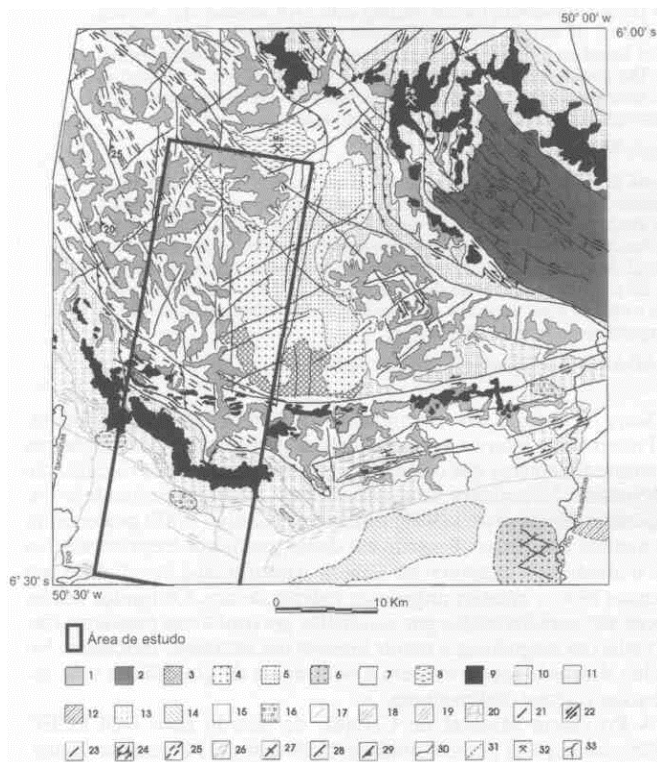
da Serra de Carajás são relacionados ao Cinturão Maroni-Itacaiúnas, do Proterozóico Inferior, enquanto que os gnaisses e as metavulcânicas e metassedimentares que constituem o corpo da Serra dos Carajás, são relacionadas à Província Amazônia Central, do Proterozóico Inferior/Arqueano. Hasui *et al.* (1984) e Hasui & Haraly (1985) propuseram um modelo alternativo, baseado em dados geofísicos e estruturais, em que o arcabouço tectônico do Craton Amazônico é constituído por diversos blocos crustais arqueanos independentes. Os limites desses blocos são caracterizados por anomalias gravimétricas positivas, fortes variações magnéticas e trends lineares das estruturas tectônicas. No núcleo desses blocos é comum a ocorrência de granitóides e de sequências vulcano-sedimentares.

A Província Mineral de Carajás, de acordo com DOCEGEO (1988), é composta por três unidades principais: (1) Complexo Xingu, com gnaisses tonalíticos à granodioríticos e rochas metasupracrustais; (2) Supergrupo Itacaiúnas, composto pelos grupos Grão-Pará (rochas metavulcânicas e metassedimentares) e Rio Fresco (metarenitos) e; (3) granitos proterozóicos. Segundo Araújo & Maia (1991) e Oliveira *et al.* (1994), a região de Carajás é parte do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de idade arqueana, separado por dois blocos crustais (blocos Belém e Araguacema). São distinguidos três domínios litoestruturais arqueanos na região: (1) Domínio Meridional, caracterizado por zonas de cisalhamento imbricadas, com rochas relacionadas aos complexos Xingu e Pium, Suíte Plaque e Grupo Sapucaia; (2) Domínio Central, de natureza direcional, com transcorrências representadas pelos sistemas Serra dos Carajás (à evolução desse sistema, Araújo & Maia (1991), associam um mecanismo do tipo flor positiva), Cinzento, Tapirapé e Buritirama, e; (3) Domínio Setentrional, caracterizado por cavalgamentos de rochas granulíticas, misturadas tectonicamente com partes do Complexo Xingu e, subordinadamente, sequências metassedimentares. Idades radiométricas de cerca de 1,88 Ga. são associadas aos corpos graníticos anorogênicos (Machado *et al.* 1991, Macambira & Lafon 1995, Dall'Agnol *et al.* 1998).

De acordo com Pinheiro (1997), a história estratigráfica e tectônica da região se inicia por um episódio de deformação dúctil sinistral (responsável pela trama milonítica do embasamento) seguido por, no mínimo, três episódios de deformação rúptil (responsáveis pelo desenvolvimento das principais feições estruturais/tectônicas, como os sistemas transcorrentes Cinzento e Carajás). O primeiro episódio de deformação rúptil destal foi o responsável pelo desenvolvimento da estrutura sigmoidal de Carajás e pela preservação de parte das sequências vulcânicas e sedimentares. Um evento posterior, transpressional sinistral, foi responsável pela inversão tectônica que afetou as rochas ao longo da Falha de Carajás. Os eventos rúptis posteriores são relacionados a reativações dos sistemas de falhas.

Santos *et al.* (1997), utilizando-se de produtos de sensoriamento remoto multifonte (dados TM-LANDSAT, SAREX, RADARSAT-1 e

gamaespectrométricos) sintetizaram, regionalmente, o atual conhecimento existente sobre a geologia da Folha Serra de Carajás (1: 100.000). Paradella *et al.* (1998), utilizando produtos integrados de radar, dados petrográficos e de campo, caracterizaram a geologia da área do Granito Central de Carajás (Fig. 1).



LEGENDA: 1 - Laterita; 2- Formação Gorotire: arenitos e conglomerados; Sulte granítica anorogênica (3 - unidade desconhecida, baixo gama CT, 4 - Anfibólio-biotita-monzogranito; 5 - Biotita-anfibólio-sienogranito/biotita-monzogranito/biotita-sienogranito, 6 - Granito); Formação Águas Claras: arenitos, siltitos e argilitos (7 - indiviso, 8 - membro inferior: argilitos); Grupo Grão Pará (9 - Formação Carajás: formações ferríferas bandadas, Formação Parauapebas; 10 - metabasaltos, 11 - metariolitos); 12 - Complexo Plum: granulitos; 13 - Grupo Sapucaia: vulcanitos máficos/ultramáficos; 14 - Sulte Plaque: granitóides; 15 - Complexo Xingu: gnaisses; 16 - Unidade com alta resposta gama urânio; Zonas de cisalhamento (17 - dúcteis a dúcteis-rúpteis, 18 - sinistrais, 19 - destrais, 20 - rampas); Zonas de cisalhamento (21 - rúpteis, 22 - sinistrais, 23 - destrais, 24 - rampas); 25 - Fraturas/Diques; 26 - Foliações miloníticas cataclásticas (27 - verticais, 28 - inclinadas); 29 - Acamamentos; 30 - Contatos geológicos; 31 - Limites sugeridos principalmente pelos dados gama; 32 - Mina; 33 - Rio.

Figura 1 - Mapa Geológico Simplificado da Folha Serra dos Carajás (fontes: Santos *et al.* 1997, Paradella *et al.* J 998).

A ESTEREOSCOPIA E O RADAR O ser humano tem a natural capacidade de ver tridimensionalmente os objetos ao seu redor. A percepção de profundidade é um processo mental sofisticado e ainda hoje pouco conhecido, que combina indicadores fisiológicos e psicológicos (Toutin & Vester 1997). Os mais importantes indicadores são: a convergência, que é o ângulo entre os eixos visuais quando um par de olhos observa um objeto pontual e a disparidade binocular, que se refere às diferenças entre as imagens de um mesmo objeto projetadas em cada uma das retinas. A estereoscopia permite criar a percepção de profundidade, através da observação de um par de imagens planas. A estereoscopia, em qualquer tipo de imageamento, depende, fundamentalmente, de dois indicadores fotogramétricos: (a) a paralaxe estereoscópica ou horizontal ou x (busca reproduzir a disparidade binocular da visão humana), que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de objetos, quando vistos de diferentes lugares e; (b) o ângulo de interseção estereoscópica (idem, com relação ao ângulo de convergência da visão humana), medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto no terreno, nas duas cenas do par. Em um mesmo par estereoscópico, a paralaxe e o ângulo de interseção

estereoscópica são diretamente proporcionais à elevação do ponto observado.

Em um par ideal de imagens estereoscópicas, as duas cenas devem ser muito similares entre si na qualidade ou conteúdo temático (tom, textura, etc.), de modo que haja uma boa correlação radiométrica entre elas. O grau de visibilidade estereoscópica de um par, ou seja, a maior ou menor facilidade de percepção tridimensional, depende, diretamente, dessa similaridade radiométrica. Esse mesmo par, por outro lado, deve ser constituído por cenas com geometrias as mais díspares possível, para que apresentem grandes paralaxes que melhorem a percepção de profundidade (Leberl 1983, Fullerton *et al.* 1986, Toutin 1996, 1997). A visibilidade estereoscópica tem papéis fundamentalmente diferentes nos sensores ópticos e no radar. Nos sistemas ópticos, as alterações de geometria, que resultem na paralaxe necessária a uma visão tridimensional, não implicam em mudanças significativas na iluminação das cenas. O radar imageador, por outro lado, tem sua própria fonte de iluminação, o que significa que, quanto maiores forem as diferenças geométricas entre as cenas do par (obtidas através de alterações da geometria de visada), maiores serão as diferenças radiométricas entre elas. Ao contrário dos sensores ópticos, no radar imageador a visibilidade estereoscópica depende do equilíbrio entre as diferenças geométricas e as similaridades radiométricas das cenas do par.

O imageamento de radar produz efeitos de deslocamento do relevo diferentes daqueles observados nos sistemas ópticos. Nas imagens SAR, as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor, enquanto que nas imagens ópticas, o deslocamento se dá inversamente. Os principais efeitos no relevo do terreno no imageamento de radar, são: *foreshortening*, *layover* e sombreamento. *Oforeshortening* é o efeito de compressão na imagem de radar, das encostas voltadas para a antena (*foreslopes*). A maior quantidade de *foreshortening* ocorre quando a encosta é perpendicular a iluminação do radar. Neste caso, a antena receberá o sinal de retorno da base e do topo da encosta ao mesmo tempo, resultando na superposição dos dois pontos na imagem. O *layover* ocorre quando o sinal de retorno de radar do topo de uma encosta atinge a antena antes do que o sinal de sua base. O sombreamento de radar representa áreas sem nenhum tipo de informação (Fig. 3).

Quanto menor for o ângulo de incidência da iluminação de radar, maiores serão os efeitos *ao. foreshortening* e *layover* e menores os de sombreamento. O fator fundamental, que condiciona a amplitude dessas distorções, é o tipo de relevo imageado. Em um relevo plano ou suavemente ondulado, por exemplo, os efeitos de relevo são minimizados, mesmo com a utilização de pequenos ângulos de incidência. Já em um relevo movimentado, uma iluminação sob maior ângulo de incidência diminui os efeitos *At foreshortening* e *layover*, porém aumenta as áreas sombreadas. Há, ainda, o efeito da micro-topografia (rugosidade na escala do comprimento de onda do SAR) no retroespalhamento de radar. Em áreas planas o seu papel é fundamental, pois vai responder, em grande parte, pelo sinal de retorno de radar à antena. Neste sentido, quanto menor o ângulo de incidência maior será o efeito da micro-topografia no retroespalhamento do sinal de radar. Os efeitos de relevo devem ser considerados na composição de um par estéreo de radar, buscando a harmonia entre as geometrias de visada das cenas e as características do relevo da área, de forma que os efeitos indesejáveis sejam minimizados, ao mesmo tempo que se obtenha um bom realce morfológico e uma boa visibilidade estereoscópica.

O radar, devido a sua geometria de observação lateral, permite que se componha, de acordo com o azimute de iluminação, pares de cenas com dois tipos de estereoscopia: de mesmo sentido e de sentidos opostos. No primeiro caso, uma mesma área é iluminada em um único sentido nas duas cenas, ocorrendo apenas variações, normalmente não muito expressivas, em seus ângulos de incidência. No segundo caso, uma mesma área é iluminada obliquamente em sentidos opostos, ocorrendo uma variação entre os ângulos de incidência, normalmente, bastante ampla. Portanto, a estereoscopia de mesmo sentido privilegia a correlação radiométrica entre as duas cenas do par, enquanto que a estereoscopia de sentidos opostos realça a disparidade geométrica entre elas. Diversos estudos teóricos e práticos têm sido realizados sobre a aplicabilidade da estereoscopia de sentidos opostos, pelas dificuldades impostas devido à grande diferença de iluminação entre as cenas (La Prade 1963, Leberl 1983, Fullerton *et al.* 1986, Toutin, 1996, 1997, 1998, Vester & Toutin 1997). Alguns autores consideram-na impraticável ou restrita a relevos planos a suavemente ondulados, porém, os trabalhos mais recentes sugerem que o treino e a experiência

do fotointérprete permitem a sua utilização na maioria das situações. Há ainda que se considerar o ângulo de interseção entre as linhas de vôo (órbitas) das duas cenas do par. Para haver percepção estereoscópica, esse ângulo não deve ser maior do que 40° (Kobrick *et al.* 1986, Toutin 1996).

DADOS RADARSAT-1 Diversos estudos radargramétricos têm sido desenvolvidos para avaliar a acuracidade geométrica na geração de modelos digitais de elevação (DEM - *Digital Elevation Model*) por meio de imagens RADARSAT-1 (Toutin 1997, 1998, Raggan & Gutjahr 1998). Segundo Toutin (1998), o uso da estereoscopia melhora em 20 a 40% a acuracidade da altimetria, com imagens no modo Standard. A acuracidade de medidas planimétricas, desenvolvidas pelo autor em um par estéreo F1-F5, foi da ordem de uma cela de resolução (7 a 9 metros). Nos sensores ópticos, o critério normalmente usado para avaliar a configuração estéreo de um par de cenas é o ângulo de interseção estereoscópica (maior ângulo = maior paralaxe). Toutin (1998) demonstra, através de cenas RADARSAT-1, que, na estereoscopia de radar, o ângulo de interseção não é o melhor indicador. Na figura 2, o autor exemplifica duas situações: (a) em uma configuração estéreo de mesmo sentido, entre os dois pares com o mesmo ângulo de interseção estereoscópica, aquele com geometria de iluminação mais vertical apresenta uma paralaxe maior; (b) em uma configuração estéreo de sentidos opostos, entre dois pares, aquele com o menor ângulo de interseção estereoscópica apresenta a maior paralaxe. Toutin (1998) sugere um critério mais adequado para a análise da configuração estéreo de radar, a partir da definição de paralaxe de elevação, como: $p = h [\cot d - \cot e]$ (1), onde p, é a paralaxe, h a elevação do alvo e d e e os ângulos de incidência das imagens da direita e da esquerda, respectivamente (Fig. 2). O autor propõe, então, o índice Razão de Paralaxe Vertical (RPV), $p/h = [\cot d - \cot e]$ (2), que tem relação direta com a paralaxe.

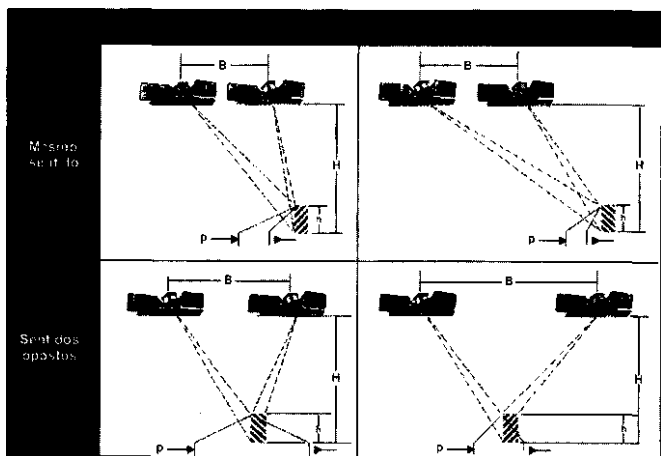


Figura 2 - Exemplos de pares estéreo RADARSAT-1 com configurações de mesmo sentido e de sentidos opostos (Toutin 1998).

A posição das cenas RADARSAT-1 em um par estéreo depende da posição do sensor (S5, S7, etc.), do sentido da órbita (ascendente ou descendente) e do tipo de estereoscopia (mesmo sentido ou sentidos opostos). Na estereoscopia de mesmo sentido, ascendente (iluminação para leste), a cena com maior ângulo de incidência deve ficar à esquerda. No caso de duas cenas descendentes, ocorre o inverso. Na estereoscopia de sentidos opostos, a cena descendente deve ficar sempre à esquerda (Fig. 2). A posição aparentemente inversa das cenas, em relação aos sensores ópticos, deve-se ao deslocamento de relevo em sentidos opostos nos dois tipos de sensores (Vester & Toutin 1997). O que ocorre, simplifadamente, é que uma observação oblíqua de radar, em um determinado sentido, equivale à de um sensor óptico em sentido oposto, a 90° da iluminação (Fig. 3).

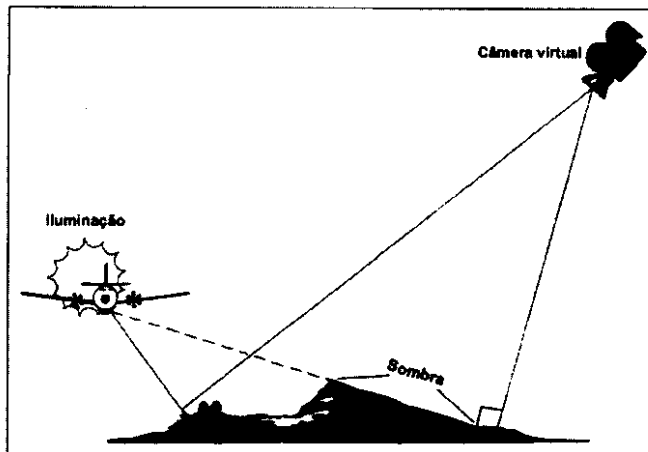


Figura 3 - Visão de perspectiva do imageamento do radar de visada lateral (fonte: Raney 1998).

Finalmente, um outro aspecto a considerar refere-se à área efetiva de estereoscopia com imagens RADARSAT-1. Dependendo da configuração usada (modo, posição, etc.), a proporção de superposição entre as cenas dos pares pode variar muito. Segundo D'Iorio *et al.* (1997), nas latitudes equatoriais, enquanto um par de cenas no modo Standard S1/S6 apresenta uma área de superposição de 96%, um outro par Standard S3/S4 tem apenas 30% de recobrimento.

Na investigação em Carajás foram usados conjuntos de imagens RADARSAT-1, no modo Standard, cópias em papel, na escala de 1:250.000. As imagens, adquiridas durante o Programa de Avaliação do RADARSAT-1 na Amazônia Brasileira (ADRO), foram originalmente processadas no formato de filmes negativos pela RSI (RADARSAT International). As imagens foram recebidas sem qualquer correção geométrica, de modo a possibilitar a visão estereoscópica, tendo sido posteriormente ampliadas em papel positivo, no laboratório da DGI (Divisão de Geração de Imagens) do INPE em Cachoeira Paulista. As características das imagens estão especificadas na tabela 1 e as dos pares estereoscópicos na tabela 2.

Tabela 1 - Características gerais dos dados RADARSAT-1 usados na investigação.

Modo	Posição	Data de Aquisição	Ângulo de Incidência (graus)	Resolução Especial (m)	Tamanho do Pixel (m)	Número de Looks	Formato da Imagem	Sentido da Órbita	Geometria de Iluminação (azimute)
S T A N D A R D	S5	31/05/96	36/42°	24,2X27	12,5X12,5	1X4	16-bits Path Image	Descendente	282°
	S5	28/08/97	36/42°	24,2X27	12,5X12,5	1X4	16-bits Path Image	Ascendente	78°
S T A N D A R D	S6	28/11/96	41/46°	22,1X27	12,5X12,5	1X4	16-bits Path Image	Ascendente	78°
	S7	11/09/96	45/49°	22,09X27	12,5X12,5	1X4	16-bits Path Image	Descendente	282°

Tabela 2 - Características dos pares estereoscópicos RADARSAT-1.

Pares Estereoscópicos	Mesmo sentido		Sentidos opostos			
	S5DxS7D	S6AxS5A	S5DxS5A	S5DxS6A	S7DxS5A	S7DxS6A
Razão de Paralaxe Vertical (RPV)	0,30	0,18	2,47	2,29	2,16	1,99
Ângulo de Interseção Estereoscópica	8,0°	4,5°	78,0°	82,5°	86,0°	90,5°
Ângulo de Interseção Entre Órbitas	0°	0°	24°	24°	24°	24°

A= ascendente D= descendente

RESULTADOS E DISCUSSÕES A Serra dos Carajás representa um relevo montanhoso e dissecado em escarpas, com altitudes de até 850 metros, sendo constituída, essencialmente, por sedimentos (Formação Águas Claras) e rochas vulcano-sedimentares de baixo grau (Formações Carajás e Parauapebas). Na parte central da Serra, a uma altitude de 450 a 500 metros e com um relevo predominantemente colinoso, ocorre um batólito granítico, o Granito Central. No entorno

da Serra, em áreas arrasadas, afloram gnaisses do Complexo Xingu, em uma planície com altitudes médias de 200 a 300 m. Essas três regiões, com características distintas de relevo, de litologia, estrutura e evolução geológica, foram escolhidas para avaliar os pares estereoscópicos RADARSAT-1 (Fig. 1).

Par S5DxS7D O par estereoscópico de mesmo sentido, descendente, S5DxS7D (Fig. 4), apresenta ótima visibilidade estereoscópica, devido ao pequeno ângulo de interseção estereoscópica (8°) e ângulo de interseção entre as órbitas de 0° .

Nas áreas associadas aos relevos mais elevados (serras), apesar da pequena Razão de Paralaxe Vertical do par ($RPV=0,30$), o realce morfológico é ótimo, tomando bastante prática e precisa a localização e a caracterização dos elementos fotointerpretativos, que permitem a definição das estruturas geológicas (feições lineares e alinhamentos de drenagem); de suas atitudes (assimetrias de relevo/drenagem) e; dos limites entre unidades geológicas (quebras negativas). O azimute de iluminação do par (282°) é pouco favorável à caracterização do principal trend estrutural (NW-SE a WNW-ESSE), em especial quando este se aproxima da direção WNW-ESE (Fig. 4, letra A). Apesar dessa dificuldade, a visão estereoscópica ainda é muito mais eficiente do que a monoscópica, particularmente na definição de lineamentos paralelos à iluminação do SAR. Em adição, outros três conjuntos principais de estruturas são muito bem realçados: N-S, NNE-SSW e NE-SW a ENE-WSW (Fig. 4, letras B, C e D). Todos esses conjuntos são inter-

prelados como estruturas planares de alto ângulo de mergulho. Já o caráter sub-horizontal das coberturas lateríticas (Fig. 4, letra E), assim como os baixos ângulos de mergulho das camadas de arenitos da Formação Águas Claras (Fig. 4, letra F), são bem caracterizados.

Na área do Granito Central, as nuances do relevo topográfico são percebidas com detalhe neste par estereoscópico. A continuidade da Falha de Carajás e a de seu braço principal (Fig. 4, letra G), ao longo do corpo granítico, indicam claramente a reativação dessas antigas descontinuidades. Conjuntos de fraturas com direções NE-SW e N-S (Fig. 4, letras H e I) também são facilmente visualizados. Todas essas descontinuidades são de alto ângulo de mergulho. Já nas áreas de planície, praticamente não há vantagens da visão estereoscópica em relação à monoscópica, devido a dois motivos principais: (a) a baixa RPV ($0,30$), implicando em um pequeno realce morfológico em uma área de poucas variações altimétricas; e (b) ângulos de incidência das cenas do par muito elevados ($85=36/42^\circ$, $S7=45/49^\circ$), para uma área plana, onde a modulação do sinal retroespalhado de radar depende, basicamente, da micro-topografia.

Com relação aos efeitos de relevo, este par é bastante equilibrado, levando-se em consideração as grandes variações altimétricas e os tipos de relevo existentes na área analisada. Dessa forma, os efeitos de *foreshortening* (não há ocorrência de *layover*, devido aos altos ângulos de incidência das cenas) e de sombreamento não tiveram qualquer significância notável na visão estereoscópica, mesmo nas áreas de relevo mais movimentado.

Par SGAxS5A O par estereoscópico de mesmo sentido, ascendente, S6AxS5A é, entre os analisados, o que tem o menor ângulo de interseção estereoscópica ($4,5^\circ$) e o ângulo de interseção entre órbitas é de 0° . Estas duas características dão ótima visibilidade estereoscópica ao par, em todas as três regiões analisadas. O único desconforto para o observador, que pode ocorrer inicialmente, é uma inversão estereoscópica do relevo, devido ao azimute de iluminação das duas cenas (78°), contrário ao dos sistemas ópticos mais normalmente utilizados (na visão monoscópica, a sensação de inversão de relevo é evitada pelo posicionamento do observador à 90° da iluminação de radar, como ilustrado na figura 3). É, também, o par com a menor Razão de Paralaxe Vertical - RPV ($0,18$).

Na região de serra, é bom o realce morfológico observado neste par. O seu azimute de iluminação é bastante favorável na caracterização do principal trend estrutural (WNW-ESE a NW-SE), e dos conjuntos de estruturas com direções aproximadas N-S e NNE-SSW. Já o conjunto de direção NE-SW a ENE-WSW, tende a tornar-se de mais difícil caracterização, à medida em que se paraleliza com a iluminação do SAR. Na região do Granito Central, a percepção tridimensional é menos realçada que no par anterior, devido à pequena disparidade geométrica entre as cenas do par ($RPV = 0,18$). Apesar disso, os principais conjuntos de estruturas planares são bem caracterizados. Com relação à área de ocorrência do Complexo Xingu, mesmo com uma geometria teoricamente menos favorável, a performance de realce morfológico desse par estereoscópico é equivalente a do par anterior. Da mesma forma, com relação aos efeitos de relevo, o comportamento equivale ao do par descendente, mesmo porque não há grandes diferenças entre os ângulos de incidência das duas cenas, nos dois pares. Os efeitos de *foreshortening* e sombreamento, portanto, não restringiram significativamente a visão estereoscópica nos casos analisados.

Pares S5DxS5A e S5DxS6A Os pares estereoscópicos de sentidos opostos S5DxS5A (Fig. 5) e S5DxS6A apresentam, entre si, um comportamento muito semelhante, devido à pequena variação nos ângulos de incidência das cenas. Eles apresentam ângulos de interseção estereoscópica muito altos ($78,0^\circ$ e $82,5^\circ$, respectivamente) e ângulo de interseção entre órbitas de 24° , resultando em uma significativa perda de visibilidade estereoscópica, principalmente nas áreas de relevo mais movimentado, onde há sérias dificuldades de se obter, inicialmente, a visão tridimensional. Tais pares exibem as maiores disparidades geométricas entre os analisados (RPVs de 2,47 e 2,29, respectivamente).

As principais dificuldades na utilização desses pares na área de serra foram: (a) a ausência inicial de percepção estereoscópica, devido à grande disparidade radiométrica entre as cenas (sombas e outros efeitos de relevo em posições opostas), e ao ângulo de interseção entre órbitas, que cria uma nova perspectiva em que um objeto é iluminado, nas duas cenas, de acordo com um ângulo oblíquo (no caso, $180-24=156^\circ$); (b) a inversão estereoscópica de relevo, devido aos

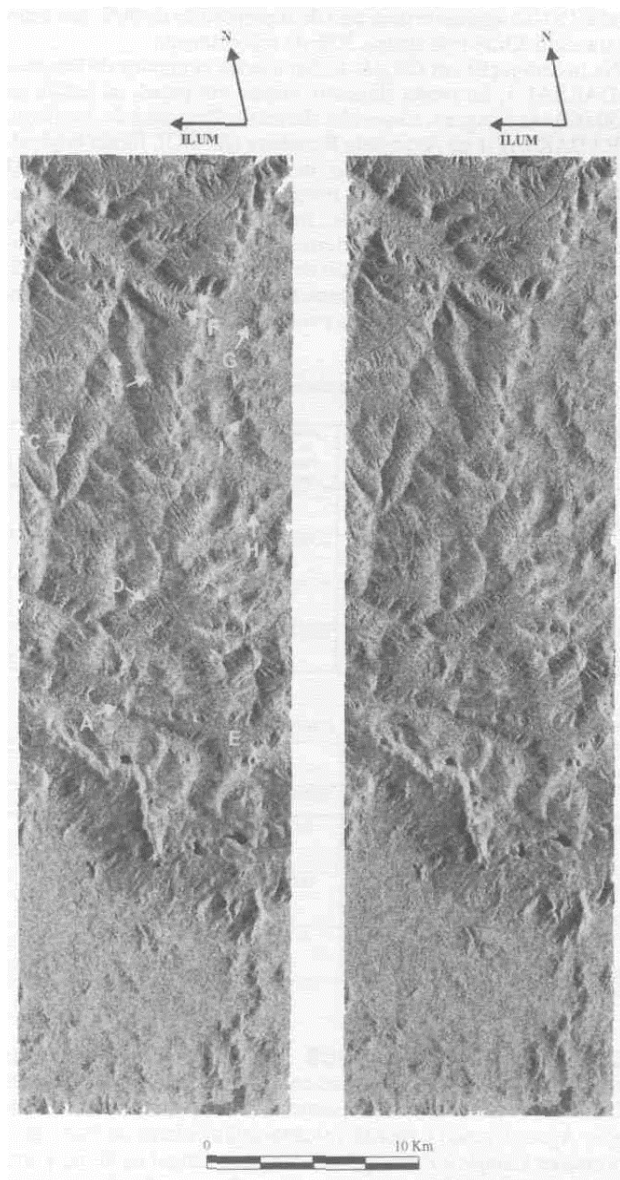


Figura 4 - Par estereoscópico S5DxS7D. As letras são discutidas no texto.

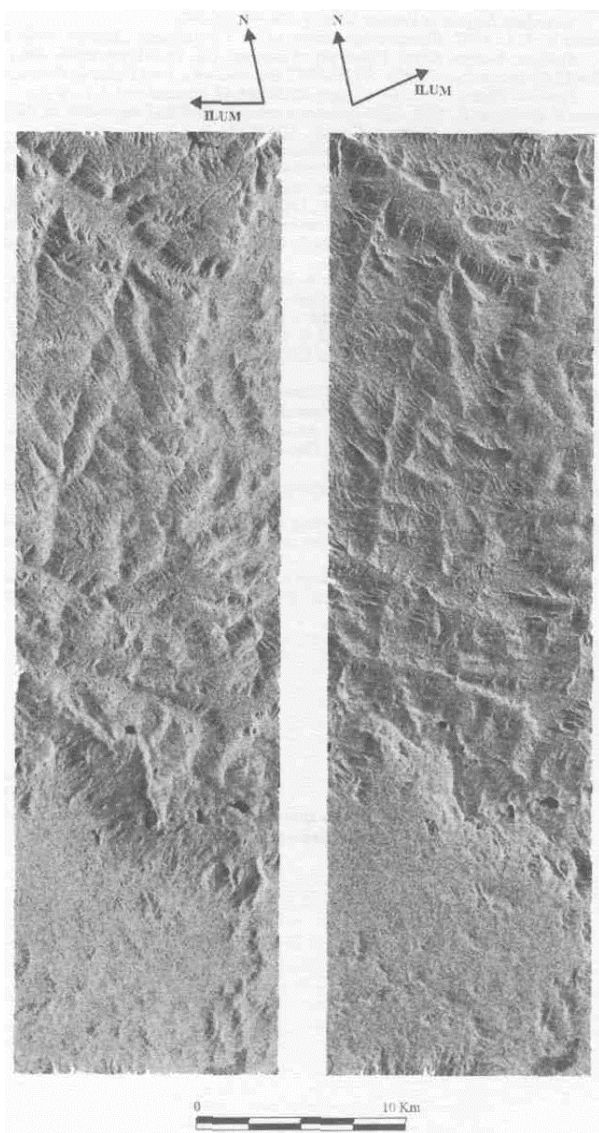


Figura 5 - Par estereoscópico SSDxSSA.

azimutes de iluminação em posições opostas; (c) o campo restrito de visão estereoscópica, ou seja, a dificuldade de acompanhar as feições de imagem e; (d) desconforto e cansaço do intérprete, em trabalhos sistemáticos. À medida em que aumenta a experiência na análise com esses pares, a maioria desses entraves pode ser, ao menos parcialmente, superada. Apesar das restrições, o realce morfológico dessas áreas de relevo mais movimentado é muito bom nesses dois pares, sem que isso represente, contudo, uma vantagem com relação aos de mesmo sentido. A única grande vantagem está no realce das estruturas planares. Há, nesse caso, uma complementação entre as duas iluminações, resultando em um bom realce de todos os principais conjuntos de estruturas.

Na região do batólito granítico, os efeitos restritivos na visão tridimensional desses pares são de menor intensidade devido ao tipo de relevo, menos acidentado, que melhora a correlação radiométrica entre as cenas. As grandes RPVs desses pares resultam em um realce morfológico ligeiramente superior ao observado nos pares de mesmo sentido. O realce das estruturas, pelos diferentes azimutes de iluminação das duas cenas, é, também, uma vantagem em relação à estereoscopia de mesmo sentido. Na planície a sul da Serra dos Carajás, a percepção de profundidade é muito restrita. Apesar das grandes RPVs, a performance desses pares é, apenas, sutilmente

superior aos de mesmo sentido. A explicação deve estar nos ângulos de incidência das cenas dos dois pares, muito altos para uma planície, onde a modulação do sinal de radar retroespalhado é dependente, basicamente, da micro-topografia (rugosidade superficial).

Pares S7DxS5A e S7DxS6A A exemplo dos anteriores, os pares estereoscópicos SVDxSSA e S7DxS6A apresentam, entre si, um comportamento muito semelhante. Apresentam os maiores ângulos de interseção estereoscópica (86,0° e 90,5°, respectivamente) entre os pares analisados e o ângulo de interseção entre as órbitas é de 24°. Há também uma significativa perda de visibilidade estereoscópica, mais crítica nos relevos mais movimentados. As dificuldades práticas de visão estereoscópica, descritas anteriormente para as regiões da serra e do Granito Central, são válidas, também, para esses pares. Apesar de apresentarem RPVs menores do que nos dois pares anteriores (2,16 e 1,99, respectivamente), não é notável qualquer alteração no exagero vertical nessas duas regiões analisadas. O que é perceptível, dado o maior ângulo de incidência de uma das cenas, é um pequeno aumento da área sombreada. Na planície, a estereoscopia desses pares foi menos eficiente que os dois anteriores, consequência de suas geometrias de iluminação mais oblíquas (menor efeito da micro-topografia) e de suas menores RPVs (menor paralaxe).

Os resultados dessa análise, com a performance de cada conjunto de pares na caracterização geológica das três regiões estudadas, estão sumariados na tabela 3.

CONCLUSÕES A análise dos pares estereoscópicos RADARSAT-1 utilizados na região de Carajás demonstrou que: (a) nas áreas de relevo escarpado da Serra, os melhores resultados foram obtidos com a estereoscopia de mesmo sentido, descendente (evita a

Tabela 3 - Performance dos pares estereoscópicos Standard RADARSAT-1 em função da geologia/relevo.

O= ótimo B=bom M= médio R=ruim

sensação de inversão de relevo), em pares com pequenos ângulos de interseção estereoscópica (características que dão ótima visibilidade estereoscópica ao par), paralaxes modestas (não há a necessidade de grandes exauros verticais); (b) nos relevos colinosos do Granito Central, a maior paralaxe da estereoscopia de sentidos opostos mostrou-se mais efetiva no realce de profundidade, sem uma significativa perda de visibilidade estereoscópica, apesar dos ângulos de interseção estereoscópica extremamente grandes e; (c) nas áreas de planície do Complexo Xingu, a menor incidência (observação mais verticalizada) nos pares apresentou um papel mais importante do que a paralaxe no realce do terreno (micro-topografia). Na estereoscopia de radar há a necessidade de buscar-se um equilíbrio entre a similaridade radiométrica e a disparidade geométrica do par estereoscópico, para que se obtenha, ao mesmo tempo, uma boa visibilidade estereoscópica e grandes paralaxes. Cabe salientar que, a experiência do fotointérprete desempenha um papel vital na extração da informação geológica, particularmente em relevos acidentados, com estéreo-pares de radar sob visadas opostas. De modo geral, a estereoscopia SAR mostrou-se vantajosa em relação à análise monoscópica. Contudo, a abordagem em estéreo depende adicionalmente, de uma seleção adequada das cenas do par e da consideração pelo geocientista do custo das imagens e da área efetiva de estereoscopia do par.

Agradecimentos À CSA (Canadian Space Agency) pelos dados RADARSAT-1, à FAPESP (Projeto 1997/10946-4) e ao CNPq (Projeto 300985/90-8), pelo suporte financeiro à investigação e a dois revisores anônimos da Revista Brasileira de Geociências pelas críticas e sugestões.

Referências

- Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck R. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth Science Review*, 17:1-9.
- Araújo O. J. B. de & Maia R. G. N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A*. Relatório Final. CPRM, Rio de Janeiro, Brasil, 136p.
- Cordani U. G. & Brito Neves B. B. 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, 12:78-88.
- Dali'Agnol R., Costi R., Leite A. A. S., Magalhães M., Teixeira N. P. 1999. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research*, 9S(1-2):9-39.
- D'Iorio M.A., Budkewitsch P., Mahmood N.N. 1997. Practical considerations for geological investigations using RADARSAT-1 stereo images pairs in tropical environments. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, Belém, *Anexo*, 10-54.
- Fullerton J.K., Leberl F.W., Marquardt R.E. 1986. Opposite side SAR image processing for stereo viewing. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*, 52 (9):1487-1498.
- Graham D. F. & Moretzohn J. S. 1997. Airborne radar data: utility for geological mapping in tropical environments, Serra Pelada, Pará, Brazil. *CIM Bulletin*, 90:108-113.
- Hasui Y., Haralv N. L. E., Schobbenhaus C. 1984. Elementos geofísicos e geológicos da Região Amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, I, Manaus, Anais, 1:129-141.
- Hasui Y. & Haralv N. L. E. 1985. Integração de informações geofísicas e geológicas na definição de estruturas crustais brasileiras. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4:248-249.
- Kobrick M., Leberl F.W., Raggan J. 1986. Radar stereo mapping with crossing flight lines. *Canadian J. Remote Sensing*, 12 (9):132-148.
- La Prade G.L. 1963. An analytical and experimental study of stereo for radar. *Photogrammetric Eng.*, 29:294-300.
- Leberl F.W. 1983. Photogrammetric aspects of remote sensing in the imaging radar. *Remote Sensing Reviews*, 1:71-158.
- Macambira M. J. B. & Lafon J. M. 1995. 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.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krough 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.
- Oliveira J. R. de, Silva Neto C. S., Costa E. J. de S. 1994. *Serra Pelada, Folha SB-22-X-C*. Relatório Final. Rio de Janeiro, CPRM, 220 p.
- Paradella W. R., Liu C. C., Veneziani P., Santos A. R., Bignelli P. A., Dias R. R., Singhroy V. H. 1994. An overview of SAREX'92 (South American Radar Experiment) data acquisition and preliminary results from Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). In: ERIM, Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10, San Antonio, Texas, *Proceedings*, 1:214-225.
- Paradella W. R., Bignelli P. A., Veneziani P., Pietsch R. W., Toutin T. 1997. 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(7):1483-1501.
- Paradella W. R., Santos A. R., Dali'Agnol R., Pietsch R. W., Sanf'Anna M. V. 1998. 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 (4):376-392.
- Pinheiro R. V. L. 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cinzeno Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil*. University of Durham, UK, Ph.D Dissertation, 408 p.
- RADARSAT International 1995. *RADARSAT Illuminated - Your Guide to Products & Services*. British Columbia, Canada, RADARSAT International, 1-1 - 4-7 p.
- Raggan H. & Gutjahr K. 1998. DEM generation using RADARSAT stereo data. In: ADRO, Final Symposium, Montreal, Canada, *ADRO 453*.
- Raney K. 1998. Radar fundamentals: Technical perspective. In: F. M. Henderson & A. J. Lewis (eds.) *Principles & applications of imaging radar, Manual of Remote Sensing*. New York, Am. Soc. Phot. and Rem. Sens., 9-130.
- Santos A. R., Paradella W. R., Veneziani P., Liu C. C., Sanf'Anna M. V. 1997. Integração de dados SAR-TM e SAR-GAMA em estudos geológicos na Província Mineral de Carajás (Brasil). In: SELPER, Simpósio Latinoamericano de Percepção Remota, 8, Mérida, Venezuela, *CD-ROM*.
- Silva G. G., Uma M. I. C., Andrade A. R. F., Issler R. F., Guimarães G. 1974. *Folha SB-22 Tocantins: Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Uso Potencial da Terra*. Rio de Janeiro, Projeto RADAM, v. 4.
- Teixeira W., Tassinari C. C. G., Cordani U. G., Kawashita K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, 42:213-217.
- Toutin T. 1996. Opposite Side ERS-1 SAR Stereo Mapping over Rolling Topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (2):543-549.
- Toutin T. 1997. Evaluation de la géométrie des images RADARSAT: Premiers résultats. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- Toutin T. 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: ADRO, Final Symposium, Montreal, Canada, *ADRO 453*.
- Toutin T. & Vester C. 1997. Understanding RADARSAT data in stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- Vester C. & Toutin T. 1997. A training package on: How to use RADARSAT Data in Stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.

Manuscrito A-1103

Recebido em 09 de julho de 1999

Revisão dos autores em 30 de outubro de 1999

Revisão aceita em 10 de novembro de 1999