

**Avaliação da Potencialidade de Discriminação de Subunidades Litológicas do
Complexo Xingu na Região de Salobo, Província Mineral de Carajás, Brasil; através de
Imagens de Radar de Abertura Sintética**

**Pedro Alberto Bignelli; Waldir Renato Paradella, Maria Carolina de Moraes e Marília
Vidigal Sant'Anna**

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Av. dos Astronautas, 1758 São José dos Campos S.P. Brasil CEP 12227-010

e-mail: {bignelli, waldir, moraes, marilia}@inpe.br;

Abstract. Airborne (Convair 580) and spaceborne (ERS-1) C-band SAR data were acquired in the Salobo area during the SAREX'92 campaign. The study area encompasses the main Brazilian Cu deposit and is located in the northern border of Carajás Province. The region is characterized by an oriented WNW-ESSE set of parallel hills (main rocks of Salobo Group) surrounded by a low relief (rocks of Xingu Complex). The vegetation is dense and is typical of the tropical upland rainforest. The Carajás Province is inserted in the Archean Itacaiúnas shear belt, a geotectonical province with metasediments, metavolcanics, gneisses and granulites. This paper discusses aspects of the evaluation of both SAR data (SAREX and ERS-1) based on visual analysis aiming at the discrimination of sub-units within the Xingu Complex.

Keywords: Radar, Salobo, Xingu Complex.

1 Introdução

Imagens de radar têm demonstrado eficiência na aquisição de informações geológicas em ambientes de densa cobertura vegetal da Região Amazônica (Silva et al. 1974; Bignelli 1994, entre outros), devido à geometria de visada lateral e imageamento nas microondas, os quais possibilitam realce das feições de relevo e obtenção de dados sob condições climáticas adversas e independentemente de iluminação solar. Assim, apesar de recentes, um acervo considerável de dados SAR estão disponíveis para esta região particular. Neste contexto, esta investigação enfoca a avaliação de imagens SAR orbitais do satélite europeu ERS-1 e imagens aeroportadas obtidas pela aeronave Convair 580 do CCRS (Centro Canadense de Sensoriamento Remoto), durante o Projeto SAREX'92 ("South American Radar Experiment'92") na Província Mineral de Carajás (Pará). O estudo objetivou, através de técnicas de análise visual das imagens SAR, avaliar o potencial destes dados na contribuição ao conhecimento geológico do Complexo Xingu, na forma de discriminação de subunidades litológicas presentes nas proximidades da jazida cuprífera do Igarapé Salobo, flanco norte da Província Mineral.

2 Fundamentação

Do ponto de vista teórico, a quantidade de energia emitida pelo radar e retroespalhada na superfície é controlada por parâmetros do alvo (constante dielétrica, espalhamento volumétrico e absorção) e por parâmetros do sistema sensor (comprimento de onda e polarização). A direção deste retroespalhamento é função da rugosidade de superfície, ângulo de incidência, ângulo de visada e forma do alvo (Ulaby, 1982). Na prática, a excelência de realce da macro-topografia e a maior sensibilidade às variações do micro-relevo (rugosidade), tornam o radar excepcional para aplicações geológicas, as quais são dependentes da caracterização do relevo. Deve-se salientar, que o radar tem sua geometria de aquisição controlada, isto é, independe das condições de iluminação solar para obtenção do sombreamento e, conseqüente, realce da topografia.

Dentre os parâmetros funcionais e de visada deste tipo de sensor, as pesquisas mais recentes para a região Amazônica, apontam como mais relevantes o comprimento de onda e os ângulos de incidência e visada (Bignelli, 1994.; Paradella et al. 1994). O comprimento de onda de 5,6 cm da banda C dos SAR utilizados, é sensível aos difusores, cujas dimensões são desta ordem de grandeza. Assim, o retroespalhamento estará vinculado às respostas das interações energia/matéria do topo do dossel e de seu arranjo interior, possibilitando estudos de abordagens geobotânicas regionais via atributos texturais, que permitem correlações entre cobertura vegetal e substrato geológico. Quanto aos parâmetros de visada, o conhecimento da geometria do imageamento, é fator importante na interpretação de imagens de radar. Na **Figura 1** são indicados os principais componentes angulares associados à obtenção de dados SAR.

A variação do ângulo de incidência, definido no alvo entre o feixe de iluminação e a vertical à superfície é fundamental no realce da morfologia do terreno. Ângulos de incidência entre 30° e 55° são adequados ao imageamento de relevos movimentados (colinosos e montanhosos) pois realçam a topografia, através do sombreamento, sem a ocorrência de distorções geométricas tipo “layover”. Por outro lado, ângulos menores tendem a ser mais adequados no realce da micro-topografia de regiões planas a pouco acidentadas., pois os valores de retroespalhamento se alteram bruscamente a partir de pequenas mudanças na incidência (D’Iório et al., 1997; Singhroy & St Jean, 1997).

A detecção e o realce da topografia é também função da direção de visada. Os melhores resultados são obtidos quando o azimute de visada é perpendicular aos traços estruturais ou principais orientações das feições de relevo. A orientação da declividade do terreno, em relação à direção de visada, é o mais importante parâmetro que influencia o sinal de retorno, suplantando a contribuição ao retroespalhamento dada pela rugosidade superficial e umidade, em áreas com relevo movimentado (Lowman *et al.*, 1987).

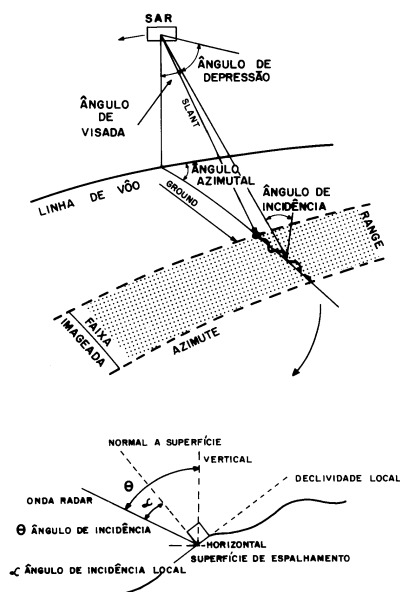


Fig. 1 - Principais elementos de visada do imageamento por Radar. Fonte: Lowman *et al.* 1987.

3 Características da área de estudo

A jazida cuprífera de Salobo localiza-se na borda norte da Província Mineral de Carajás (centro em 50°30'W e 5°57'S). Os aspectos fisiográficos característicos desta região são marcados por vegetação de floresta tropical ombrófila densa e por um conjunto de serras, alinhadas na direção WNW-ESE, circundadas por terrenos arrasados, onde as altitudes variam de 200 a 750m (Figura 2).

A Província é palco de estudos geológicos desde os anos 30, quando do registro de descoberta da primeira ocorrência de formações ferríferas na área. Na década de 80, as pesquisas regionais foram desenvolvidas no âmbito das interpretações geotectônicas, com as propostas de Cordani & Brito Neves (1982) que idealizaram para a área um modelo caracterizado por cinturões móveis marginais, do Proterozóico, que envolvem um núcleo cratônico de idade Arqueana. Assim, rochas granulíticas e migmatíticas a norte da Província de Carajás estariam relacionadas ao Cinturão Maroni-Itacaiúnas e os gnaisses, metavulcânicas e metassedimentos do interior da Serra seriam relacionados à Província Central Amazônica.

Hasui *et al.* (1984) apresentaram uma alternativa com base em dados geofísicos e estruturais. Neste modelo, o arcabouço tectônico do Craton Amazônico é concebido como um conjunto de blocos crustais independentes, de idade Arqueana. No núcleo destes blocos seriam comuns rochas granitóides e seqüências vulcano-sedimentares e as bordas seriam delineadas pelos “trends” lineares das estruturas tectônicas. Desta forma, a área de estudo está inserida dentro do Cinturão Arqueano Itacaiúnas, como uma ampla zona de cisalhamento composta por metassedimentos, metavulcânicas, gnaisses e granulitos. Neste Cinturão estão alocadas rochas dos Complexos Xingu, além das supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas e várias exposições de granitos anorogênicos do Proterozóico Médio.

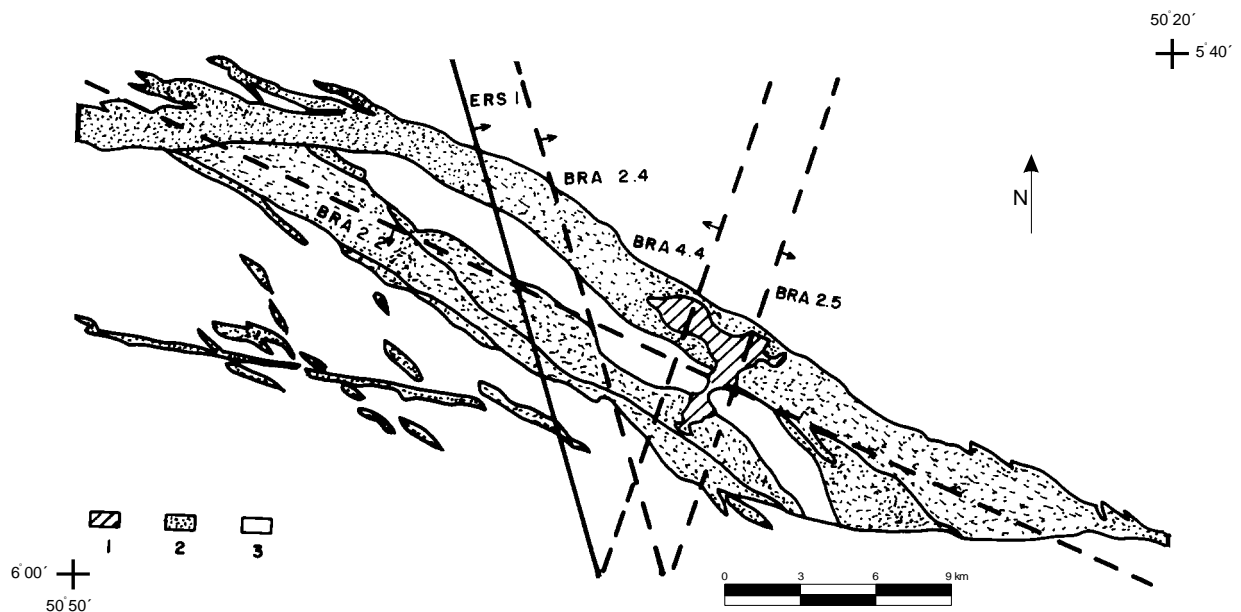


Fig. 2 - Esquema geral da região de Salobo com a configuração dos recobrimentos SAR utilizados neste estudo. (1) Cobertura Laterítica; (2) Supracrustais do Grupo Salobo e (3) Complexo Xingu. Fonte: Adaptado de Siqueira (1990).

Esta estrutura regional subdivide-se em dois domínios: (1) Domínio Imbricado e (2) Domínio Transcorrente. Dois episódios tectônicos do Arqueano são reconhecidos durante o desenvolvimento destes sistemas: o primeiro relacionado a movimento destal transtensional que afetou o embasamento, formando bacias preenchidas por rochas vulcano-sedimentares (Supergrupo Itacaiúnas); e o segundo, uma inversão tectônica que originou um deslocamento transpressional sinistral ao longo dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento (Costa et al. 1995).

3.1 Contexto Geológico Local

No Cinturão Itacaiúnas, a área do depósito de Cu de Salobo está situada na Bacia Carajás que corresponde a um “rift” continental Arqueano (Lindenmayer 1990), formado por três unidades: (1) basal, de rochas vulcânicas continentais (Formação Parauapebas), (2) intermediária, composta por formação ferrífera bandada (Formação Carajás) e (3) superiores metassedimentares (Formação Águas Claras e Grupo Salobo). A constituição litológica da seqüência Salobo é composta por faixas e lentes de formações ferríferas, quartzitos, anfíbolitos, anfibólio-xistos, quartzo-clorita xistos e gnaisses diversos, orientadas na direção WNW-ESE. Os gnaisses são atribuídos ao Complexo Xingu, enquanto as demais unidades litológicas pertencem ao Grupo Salobo.

O Complexo Xingu é considerado como um conjunto de rochas infracrustais ocorrentes no Craton Amazônico com ampla distribuição na área de estudo. As unidades rochosas do Complexo Xingu caracterizam-se pelo relevo pouco movimentado e grau de dissecação médio a alto. Ocupam áreas arrasadas, com morrotes baixos de topos convexos que, em geral, assumem formas de meia-laranjas. Mantém relação de contato concordante, com contornos em forma de lentes, com todas as unidades do Cinturão Itacaiúnas na área.

Neste contexto, os principais termos petrográficos caracterizados são: gnaisses granodioríticos, graníticos, dioríticos e tonalíticos, mais ou menos migmatizados, metassedimentos e anfíbolitos. Estas rochas são bandadas, de granulação média a grosseira, constituídas à base de plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, hornblenda e actinolita, indicando estabilidade em condições térmicas na fácies anfíbolito, segundo Siqueira & Costa e Costa & Hasui (1991). Datações U-Pb apontam para os gnaisses do Complexo Xingu idades de 2,9 Ga em Carajás, porém admite-se que esta idade corresponda ao último evento de migmatização ocorrido na área. Com isso, propõe-se um evento no final do Arqueano, que deve corresponder à milonitização regional, e um evento de reaquecimento no Proterozóico Inferior.

4 Dados disponíveis

A imagem SAR do satélite ERS-1 aqui utilizada foi obtida em 24/04/92 em órbita descendente, banda C-VV; resolução espacial de 25 X 25m; em 7 looks, faixa de recobrimento de 100 x 100Km; ângulo de incidência de 23° no centro da imagem; e direção de visada S78°W (ESA 1992).

As cenas de radar aeroportado para a área de Salobo foram obtidas pelo Experimento SAREX em 15 de abril de 1992, na banda C e dupla polarização (HH e VV).

O SAR CV580 adquiriu imagens sob quatro diferentes modos de operação. Estes imageamentos foram obtidos, com ângulos de incidência, polarização, direção de visada e frequência, conforme ilustra a **Tabela 1**.

TABELA 1 - Quadro Comparativo dos Modos de Aquisição do SAR CV 580

	Modo	Banda de Freqüência	Polarização	Dir. de Visada	Âng. Incidente
BRA 2.2	Estreito	C	HH, VV	S40°W	35-76°
BRA 2.4	Nadir	C	HH, VV	N78°E	18-70°
BRA 2.5	Nadir	C	HH, VV	S12°E	18-70°
BRA 4.4	Amplio	C	HH, VV	N78°W	45-80°

Estas imagens apresentam-se em projeção oblíqua do ponto de vista do SAR (“slant range”), sendo processadas em tempo real pelo STCF (“Sensitivity Time Control Factor”) em 7 “looks” detectada em 8 bits.

5 Abordagem metodológica da área de estudo

A interpretação visual das imagens de radar, para fins de mapeamento geológico, está baseada nas observações similares às usadas para fotografias aéreas (Koopmans, 1985). As variações de textura e tonalidade são os elementos a serem reconhecidos, com objetivo de se identificar a distribuição espacial de unidades homólogas que levarão à dedução do modelo geológico da região. Este estudo qualitativo exige uma análise padronizada, e por isso optou-se pelo Método de Fotointerpretação Lógico - Sistemático de Soares & Fiori (1976), adaptado para imagens orbitais por Veneziani & Anjos (1982), que leva em conta os elementos naturais (relevo e drenagem), suas formas, dimensões e tonalidades que constituem conjuntos com propriedades similares, que uma vez discriminadas geram um mapa fotogeológico.

As imagens SAR CV580 adquiridas no projeto SAREX foram interpretadas em papel fotográfico na escala 1:50.000. Optou-se pela análise dos produtos na projeção “slant range”, já que a projeção em “ground range” apresenta-se bastante distorcida (MacDonald e Waite, 1971). Este problema deve-se ao fato de que a correção de projeção feita em tempo real não levou em conta o modelo digital do terreno, necessário no caso da área teste que apresenta uma brusca variação topográfica nos intervalos das faixas de recobrimento. Por sua vez, a cena SAR ERS-1 foi interpretada em papel fotográfico na escala aproximada de 1: 100.000.

6 Discussão

As publicações de DOCEGEO, (1988) e Siqueira, (1990) relacionam a ocorrência do Complexo Xingu como representante do embasamento Arqueano na Província de Carajás, sem individualizar nos mapas os tipos rochosos que compõem esta Unidade. Nesta abordagem preliminar nota-se, nas cenas de radar, uma diferença de densidade de elementos texturais de relevo no interior das áreas mapeadas, como a Unidade Indiferenciada Xingu, a qual será discutida a seguir.

Devido a grande diferença na resolução espacial entre os dois sensores SAR (6m no aerotransportado e 25m no sensor orbital) optou-se por uma discussão em separado dos produtos analisados.

SAR ERS-1

No produto ERS-1, (**Figura 3**) é possível a subdivisão de duas unidades distintas para o embasamento granito gnáissico da área estudada. Os elementos texturais de relevo da Associação Xingu 1 (E_1) apresentam visualmente alta densidade e podem ser interpretados como mais resistentes à erosão. Por outro lado, o aspecto homogêneo e de baixa densidade de elementos texturais de relevo na Associação Xingu 2 (E_2), levam a interpretação de um terreno arrasado sustentado por rochas metassedimentares e metavulcânicas pouco resistentes à erosão.

SAR CV580

O produto escolhido para representar os recobrimentos SAREX em Salobo foi a faixa BRA 2 2 HH em sua fração noroeste. Esta escolha decorre do fato desta imagem ressaltar melhor os elementos texturais de relevo dentre as diversas analisadas por Bignelli (1994).

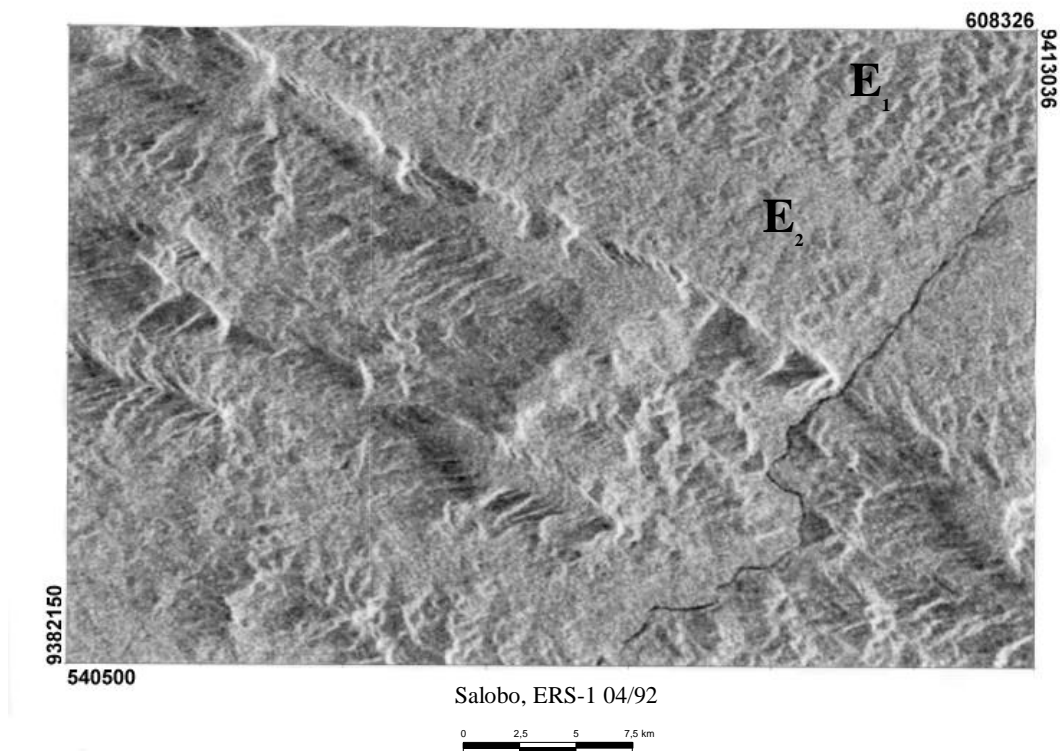


Fig. 3 - Imagem SAR do satélite ERS-1 obtida em 24/04/92 (órbita 4048, descendente).

E_1 : Associação Xingu 1; E_2 : Associação Xingu 2.

Nesta cena, fica claro a discriminação das duas associações rochosas (Xingu 1 e 2), as quais apresentam nítida distinção em todos os produtos SAREX analisados, conforme demonstram a **Figura 4** e a **Tabela 2**.

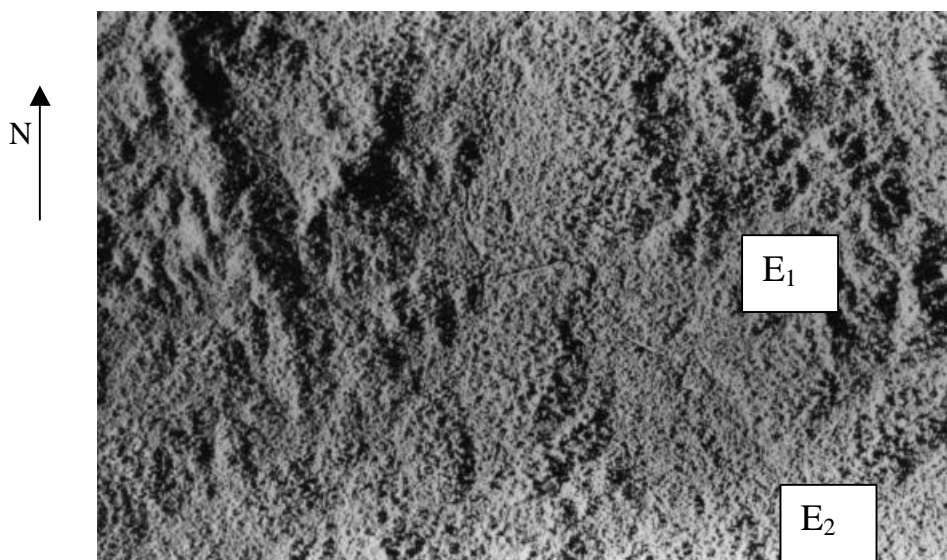


Fig. 4 - Diferenças entre elementos texturais de relevo e de tonalidade entre as associações Xingu 1 (E_1) e Xingu 2 (E_2), na faixa BRA2.2 HH escala 1: 50.000.

TABELA 2 - Complexo Xingu - Arqueano

Unidade	Litotipo	Textura	Estrutura	Tropia	Permeabilidade	Resistência a Erosão	Tom
Associação Xingu 1 (E ₁)	Gnaisses Granodioritos Granitos Migmatizados	Densidade alta	Reticulada de 4 ^a Ordem	Multi-direcional Ordenada	Baixa	Média	Cinza Médio
Associação Xingu 2 (E ₂)	Paragnaisites Anfibolíticos	Densidade baixa	Pouco Definida	Multi-direcional Pouco Ordenada	Média	Baixa	Cinza Claro

7 Avaliação dos Parâmetros de Visada dos SAR na Discriminação das Subunidades Litológicas do Complexo Xingu

Os fatores mais importantes no contexto desta pesquisa foram os parâmetros de visada: ângulo de incidência e direção de visada.

Ângulo de Incidência

Basicamente o efeito do ângulo de incidência é ilustrado graficamente pelo diagrama de Lung em Lowman *et al.*(1987) na **Figura 5**.

O modo estreito representado pela faixa de recobrimento BRA2.2 apresenta seu conjunto de ângulo de incidência compreendido entre 45° e 76°, isto é, todo ele na faixa da região de platô onde o coeficiente de retroespalhamento é mais independente de mudanças do ângulo incidente. Nesta imagem, o efeito da macro-topografia e respectivo sombreamento dominam as variações de intensidade de retroespalhamento. Assim, as duas subunidades Xingu diferenciam-se por seus elementos texturais de relevo, significativamente mais evidentes na Unidade Xingu 1.

Por outro lado, na imagem originada pelo radar orbital ERS-1 sob ângulo de incidência médio de 23°, o diagrama de Lung, demonstra que o retroespalhamento em áreas arrasadas é muito mais sensível a ângulos incidentes nesta faixa, e a variação deste é governada pela alternância no ângulo incidente local através da micro-topografia.

Por este motivo, a performance do sensor ERS-1 nas áreas de ocorrência do Complexo Xingu é satisfatória, apesar da presença do efeito “layover” decorrentes de áreas de relevo montanhoso.

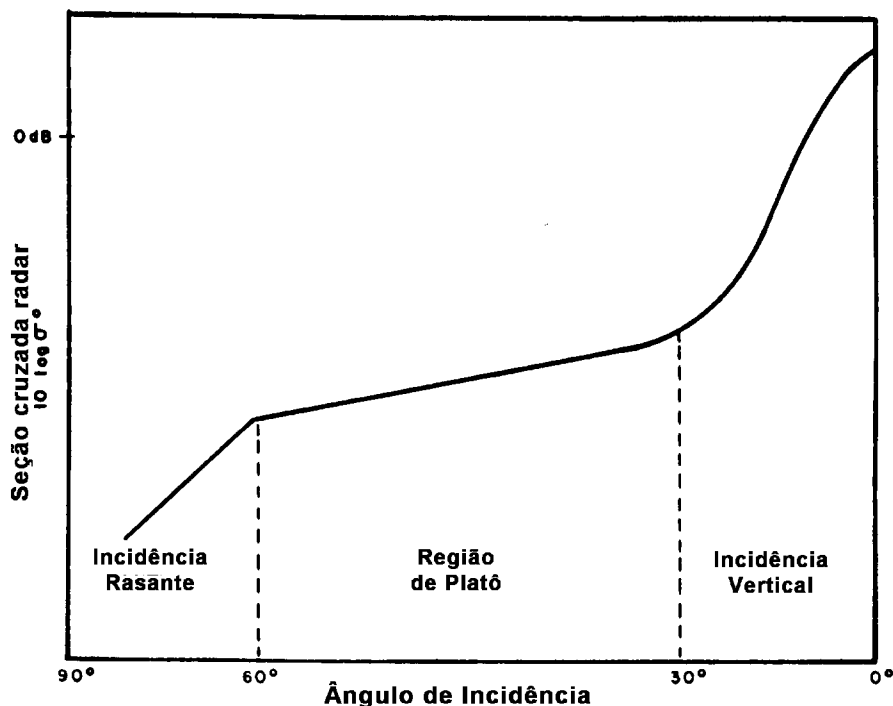


Fig. 5 - Diagrama de Lung ilustrando a influência do efeito ângulo de incidência no coeficiente de retroespalhamento radar. FONTE: Lowman *et al.*(1987).

Direção de Visada

O aspecto das feições do terreno nos imageamentos SAR é altamente dependente da direção sob a qual estas são visualizadas. Para mapeamentos geológicos, os melhores resultados são obtidos quando a direção de visada do radar está orientada perpendicularmente ao “trend” estrutural-morfológico da região estudada, (Koopmans, 1985).

Desta observação admite-se que para a região estudada a melhor direção de visada fica por conta da faixa BRA2.2 (modo estreito), ou seja, S40°W.

8 Conclusões

Os dados apresentados e as discussões precedentes possibilitam a formulação das conclusões que seguem. Cabe mencionar que estas devem se restringir ao domínio estudado, pois ainda não se dispõem de suficiente conhecimento para permitir extrapolações para outras áreas.

1- É possível a subdivisão da unidade denominada genericamente como Complexo Xingu, em no mínimo duas Associações: (1)- Associação Xingu 1 (E_1) - como composta por rochas granito gnáissicas migmatizadas, discriminada pela tropia multidirecional ordenada de elementos texturais de relevo e drenagem e média resistência a erosão e; (2)- Associação Xingu 2 (E_2) - caracterizada como um conjunto de litologias metassedimentares e metavulcânicas com migmatização (fácies anfíbolito), discriminada pela estruturação desordenada e baixa resistência a erosão, aparecendo na área estudada como extensas áreas planas com aspecto tonal cinza claro

homogêneo. A presença destas distintas respostas para estas unidades nas imagens ERS-1, e não mapeadas previamente, enfatiza a importância do uso dos dados SAR na detecção de unidades litológicas neste tipo de ambiente.

2- Pode se afirmar que o ângulo de incidência e seu complementar ângulo de depressão são os principais parâmetros na obtenção da discriminação textural das subunidades do Complexo Xingu. Assim, a faixa do modo estreito com ângulos incidentes compreendidos entre 45° e 76°, maximiza a extração de feições estruturais e texturais por sombreado. Por sua vez, a imagem obtida pelo sensor radar orbital ERS-1 que tem ângulo incidente médio igual a 23°, apresenta boa performance quanto as informações obtidas nas áreas mais arrasadas (Associações Xingu), por motivos abordados no item anterior.

Referências bibliográficas

- BIGNELLI, P.A. 1994. **Avaliação dos dados de radar (SAR) do Projeto SAREX'92 e ERS-1 em mapeamento geológico na região de Salobo, Província Mineral de Carajás.** São José dos Campos, INPE, 124p.
- CORDANI, U. G. & NEVES B. B. B. 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. **Revista Brasileira de Geociências**, 12(1, 2, e 3): 78-88.
- COSTA, J. B. S.; ARAÚJO, O. J. B.; SANTOS, A.; JOÃO, X. S. J.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. 1995. A Província Mineral de Carajás: Aspectos Tectono-estruturais, Estratigráficos e Geocronológicos. **Paraense Emílio Goeldi Museum Bulletin**, 7: 199-235.
- COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. 1991. O Quadro Geral da Evolução Tectônica da Amazônia. **Boletim** do Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 3. Rio Claro, 142-145.
- D' IÓRIO, M. A.; BUDKEWITSCH, P.; MAHMOOD, N. N. 1997. Practical Considerations for Geological Investigations Using RADARSAT-1 Stereo Image Pairs in Tropical Environments. In: International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa. **Anais**.
- DOCEGEO 1988. Revisão Lito-estratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém, 1988. **Boletim Especial**. Belém, S.B.G., p.11-54.
- ESA 1992. **ERS-1 System**. Noordwijk, Netherlands, Pam Vass & Bruce Battrick ed., 1992. 85p.
- HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E.; SCHOBENHAUS, C. 1984. Elementos Geofísicos e Geológicos da Região Amazônica; Subsídios para o Modelo Geotectônico. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 2., Manaus, Brasil, **Anais**, Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 129-147.
- KOOPMANS, B.N. 1985. Report on the Results in Geology and Geomorphology of the European SAR-580 Experiment. **ITC Journal**, 3:203-206.
- LINDENMAYER, Z. G. 1990. **Salobo, Carajas, Brazil: Geology, Geochemistry and Metamorphism**. University of Western, Ontario, Canada. 407 p.
- LOWMAN JR, P.D.; HARRIS, J.; MASUOKA, P.M.; SINGHROY, V.H.; SLANEY, V.R. 1987. Shuttle Imaging Radar (SIR-B) Investigations of the Canadian Shield: Initial Report. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE25** (1): 55-66.

- MACDONALD, H.C.; WAITE, W.P. 1971 Optimum Radar Depression angles for geological analysis. **Modern Geology**, 2: 179-193.
- PARADELLA, W. R., BIGNELLI, P. A.; VENEZIANI, P.; PIETSCH, R.W.; TOUTIN, T.; SINGHROY, V.H. 1997. Airborne and Spaceborne SAR Integration with TM-Landsat and Gamma Ray Spectrometry for Geological Mapping in a Tropical Rain Forest Environment". **International Journal of Remote Sensing**, 18 (7): 1483-1501.
- PINHEIRO, R. V. L. 1997. **Reactivation History of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil**. Durham University, Eng., 407 pg.
- SILVA, A. C. et al. 1974. **Folha SB-22 Araguaia e parte da Folha SC-22 Tocantins**. Rio de Janeiro, D.N.P.M., 1974. (levantamento de recursos naturais, 4) 728 p.
- SINGHROY, V.; ST. JEAN, R. 1997. Guidelines for the Selection of RADARSAT Beam Modes for Geological Mapping. In: International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa. **Anais**.
- SIQUEIRA, J. B. 1990. **Organização lito-estrutural do Duplex Salobo-Mirim, Serra de Carajás**. Belém, Universidade do Pará, 1990, 125p.
- SIQUEIRA, J. B.; COSTA, J. B. S. 1991. Evolução Geológica do Duplex Salobo-Mirim. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 3., Belém, 1991. **Anais**. Belém, Brasil, S.B.G., p. 232-243.
- SOARES, P. C.; FIORI, A. P. 1976. Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. **Notícia Geomorfológica**, 16 (3): 71-104, 1976.
- ULABY, F. F.; MOORE, R. K.; FUNK, A. K. 1982 **Microwave Remote Sensing: Active and Passive**. Reading. MA, Addison-Wesley, v.2. 320p.
- VENEZIANI, P.; ANJOS, C. E. 1982. **Metodologia de Interpretação de Dados de Sensoriamento Remoto e Aplicações em Geologia**. São José dos Campos, INPE, 1982. 45p. (INPE-227-MD/014).