

**Radar em Aplicações Geológicas: Os Experimentos Sarex na  
Província Mineral dos Carajás (Pará) e Airsar  
no Vale do Rio Curaçá (Bahia)**

WALDIR RENATO PARADELLA

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515  
12201 - São José dos Campos, SP, Brasil  
waldir@ltid.inpe.br

**Abstract.** Radar plays a powerful role in geological applications because viewing geometries can be optimized for distinct terrain types in a mode similar to photogeological analysis based on low sun-angle photography. In addition, physical information regarding terrain conditions such as surface roughness, dielectric properties, subsurface discontinuities and topographic features can be also addressed. For tropical environments, the impact of high resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) with distinct frequencies, polarizations and viewing geometries must be evaluated in order to allow the information to be fully extracted by the geoscientist. This papers outlines the main characteristic and scientific aspects of two long-term investigations in the Brazilian Tropics: the SAREX'92 (South American Radar Experiment) in the Carajás Mineral Province, Amazon Region, and the AIRSAR experiment in the Curaçá Valley, a semiarid site, located in the Northeast of Brazil. The paper also presents a brief review of radar characteristics focussing on vegetation and geological applications.

## 1. Introdução

Com o advento de programas com radar imageador de abertura sintética (SAR), tais como os do ERS-1, JERS-1 e RADARSAT, novas abordagens devem ser desenvolvidas no âmbito de extração de informações de significado geológico dos vários ambientes do planeta. Neste sentido, pela ausência de pesquisas, uma ênfase especial deve ser dada às investigações em ambientes tropicais áridos e úmidos (Singhroy 1992). É neste contexto, que estão sendo conduzidos os experimentos de longa duração SAREX e AIRSAR

no país, em ambientes fisiográficos tropicais distintos e de geologia complexa. Estas investigações servirão de passos iniciais na avaliação geológica mais abrangente de dados SAR, obtidos por aeronaves e por satélites, no ambiente tropical.

## 2. Fundamentação

Várias são as motivações para o uso de dados SAR em investigações geológicas, tais como: (1) a possibilidade de imageamento mesmo em situações adversas de cobertura de

nuvens, o que é comum em condições tropicais; (2) o fato da geometria de iluminação ser controlada; (3) a maior sensibilidade do imageamento nas microndas às variações da morfologia da superfície que o imageamento no espectro óptico; (4) a possibilidade de variações em frequência (comprimento de onda) e polarização no imageamento, fornecendo informações sobre características de rochas, seus produtos de alteração, estruturas e associações geobotânicas e (5) o imageamento independente de iluminação solar.

O espalhamento das ondas eletromagnéticas na superfície do planeta é fortemente dependente do comprimento de onda (Ulaby et al. 1982). O nível de cinza de um pixel em uma imagem SAR é relacionado à intensidade do retroespalhamento, que é função da topografia (declividade), da permitividade e da rugosidade (na escala da frequência utilizada) do alvo imageado, além de eventuais discontinuidades na subsuperfície (Evans 1992). Isto leva a que o uso de dados SAR para aplicações geológicas seja limitado, a não ser que os relacionamentos entre rochas, seus produtos de alteração, cobertura vegetal e as características discutidas acima sejam razoavelmente compreendidos. A discussão a seguir sumaria os principais aspectos de imageamento SAR obtidos a partir da revisão sobre este tema preparada no âmbito do Programa EOS (NASA 1988) e da análise bibliográfica publicada pelo CCRS sobre a aplicação de radar em estudos florestais (Werle 1989).

Em relação a cobertura

vegetal, aplicações com SAR requerem uma variedade de frequências, já que os dosséis são normalmente compostos de uma grande gama de dimensões de espalhadores ou difusores (fôlhas, ramos, caules, troncos), dispostos em várias orientações. A figura 1 exemplifica a resposta ideal esperada de radar (em diferentes comprimentos de onda) em função do tamanho dos principais difusores que constituem o dossel. Assim, um radar operando a um dado comprimento de onda é sensível aos difusores, cujas dimensões são daquela magnitude. Além da geometria do dossel, o retroespalhamento depende do conteúdo de umidade e do índice da área foliar.

No que se refere à interação e penetração da radiação no dossel, radares em frequência X (3,0 cm de comprimento de onda), fornecem medidas da interação energia/matéria ao nível do topo do dossel ("canopy top scattering"); radares em banda C (6 cm) já permitem interações da radiação do topo do dossel e principalmente do seu arranjo interior ("canopy top and volume scattering"), radares em frequência L (23 cm) terão respostas ligadas a interações do topo do dossel, e principalmente do seu interior e da superfície do terreno ("canopy top, volume and surface scattering") e finalmente, radares na frequência P (68 cm) serão mais sensíveis a interações com os troncos e superfície do terreno (efeitos "double-bounce").

Estudos relacionados a biomassa foliar, ao tipo vegetal e suas condições, são melhores conduzidos a comprimentos de ondas menores (bandas X e C) e elevado ângulo

de incidência, onde espalhamentos de topo do dossel e de volume predominam. Entretanto, as bandas L e P podem realçar o retorno de biomassa lenhosa (troncos). A umidade do dossel é melhor caracterizada com dados SAR quando a contribuição do espalhamento do terreno é minimizado, i. é, através da banda X. Em contrapartida, o estado da interface superfície/vegetação é melhor observado através de imageamentos nas bandas L e P, quando a contribuição do dossel é minimizada.

Em relação às rochas e produtos de alteração, pesquisas tem demonstrado que o ruído (speckle) do terreno é minimizado para comprimentos de onda mais curtos. Nestas frequências (bandas X ou C), a maioria das superfícies de rochas aparece rugosa (microtopografia) e tende a favorecer estudos de desertificação, tectônicos e de estruturas crustais. Por outro lado, com bandas de maior comprimento de onda (L e P), ocorrerá maior penetração na superfície de alteração de rochas e solos, sensíveis ao intemperismo em ambientes mais áridos, ou maior penetração na cobertura vegetal, o que pode favorecer abordagens geobotânicas

No que se refere a polarização, os ecos de radar são mais intensos na polarização paralela e mais fracos na polarização cruzada. Nos sistemas de polarização paralela (HH e VV), as respostas mais intensas ocorrem quando os difusores são orientados na mesma direção da polarização da onda incidente. O retroespalhamento de polarização cruzada resulta ou de múltiplos espalhamentos

associados à difusão de volume (tais como no dossel de vegetação) ou de múltiplas interações de retorno (bounce) associadas com refletores diédricos naturais, tais como afloramentos de rochas. Deste modo, as imagens de polarização cruzada, embora com sinais de retorno mais fracos, podem estar vinculadas a informações valiosas sobre características de dosséis, estruturas e composições de rochas.

No que se refere a estudos de vegetação, VV será mais útil para observações de caules e troncos; HH realçará mais a estrutura do dossel horizontal. Já a polarização cruzada pode ser importante como um indicador de múltiplos espalhamentos, os quais podem estar relacionados com a biomassa foliar. Para estudos geológicos, é esperado que polarização HH seja mais sensível à penetração em sedimentos e às superfícies expostas, as quais tendem a ser mais orientadas na horizontal que verticalmente. Polarização cruzada pode fornecer informações interessantes que permitam a separação de alvos na natureza com comportamentos distintos de espalhamento (especular, difuso e volumétrico).

Finalmente alguns comentários devem ser feitos em relação à geometria de imageamento. Na Figura 2 são indicados os mais importantes parâmetros angulares associados ao imageamento de um SAR. Os ângulos de incidência e de azimute são determinados pelo ângulo de apontamento do feixe da antena. O ângulo de incidência é definido no alvo a partir da normal à superfície. Além disto, quanto maior a faixa imageada, maior o intervalo de ângulos de

incidência ao longo da faixa.

A Figura 3 mostra o comportamento de superfícies lisa, moderadamente rugosa e rugosa, em função do ângulo de incidência para um SAR de frequência e polarização fixos. As curvas de retroespalhamento ( $\sigma^0$  vs  $\theta$ ) indicam um rápido decréscimo no retroespalhamento com o aumento do ângulo de incidência para as superfícies, considerando-se ângulos de baixa magnitude. Para ângulos maiores, a inclinação da curva diminui com o aumento do ângulo de incidência. Além disto, a magnitude e a forma das curvas definem perfis característicos para as três superfícies consideradas.

Para a discriminação de diferenças de rugosidade de superfícies em terrenos planos (estudos de erosão, de desertificação, de corpos de água, etc.), ângulos de incidência próximos ao nadir são preferíveis. Para terrenos colinosos ou montanhosos, a rugosidade da superfície é realçada sob ângulos de incidência elevados. Neste contexto, mesmo em situações em que a sensibilidade à rugosidade superficial sob elevado ângulo de incidência seja baixa, o impacto de variações de declividade (topografia) no retroespalhamento será minimizado. Em outras palavras, a rugosidade superficial é realçada e é menos influenciada pelas variações de topografia no imageamento do "far range".

Para o imageamento de superfícies constituídas de interfaces (afloramento/solo e vegetação), a combinação de ângulos de incidência baixos e elevados, pode ser eficiente na discriminação das duas interfaces de alvos. Ângulos

elevados permitem uma menor penetração, fornecendo uma contribuição maior do espalhamento volumétrico da vegetação. Ângulos de incidência menores são mais adequados para minimizar o efeito dos difusores na camada superior (vegetação) e para maximizar o retorno da contribuição da superfície.

Nas aplicações geológicas, o realce da topografia é fundamental na caracterização da morfologia da superfície. Observações sob altos ângulos de incidência realçam a topografia devido ao sombreamento e ao baixo retorno do sinal (espalhamento e atenuação). Para que uma feição topográfica provoque sombreamento, sua declividade deve exceder o complemento do ângulo de incidência do imageamento (para um ângulo de incidência de 55 graus, a declividade deve ser superior a 35 graus). Por outro lado, a topografia pode também ser realçada através de imageamentos sob baixos ângulos de incidência. Devido à característica de retroespalhamento mudar drasticamente sob baixos ângulos, a informação do terreno não é perdida como sombreamentos, o que é comum sob ângulos elevados de incidência. O inconveniente agora é que observações sob baixos ângulos vão acarretar graves distorções geométricas em áreas de intenso relevo. Em síntese, imageamentos sob ângulos de incidência entre 15 e 20 graus e 55 a 65 graus são desejáveis para o realce de feições topográficas que se expressam de modo tênue na superfície.

Uma outra vantagem no uso de imageamento de radar com diferentes ângulos de incidência está na

possibilidade de geração de imagens com estereoscopia. Quanto maior a diferença no ângulo de visada do estereopar, maior o exagero no terreno. Para análise visual em Geologia, é recomendável que as duas imagens sejam adquiridas sob ângulos de incidência maior que 30 e menor que 50 graus, minimizando efeitos de sombreamentos e "layover".

### 3. O Experimento SAREX

O **SAREX** (South American Radar Experiment) correspondeu a um programa de imageamento por radar em aeronave (Convair 580), na banda C e com polarizações HH e VV, de várias áreas na América do Sul (Wooding e Attema 1992). Na Amazônia brasileira foram imageadas quatro áreas testes, sendo três no Pará (Carajás, Tucuruí, Tapajós) e uma no Acre (Sena Madureira). O escopo principal da missão foi o de simular o RADARSAT (radar orbital canadense com banda C e polarização HH previsto para lançamento em 1995) e também permitir uma comparação com os dados do ERS-1 (SAR orbital da comunidade europeia, operando desde 1992, na banda C e com polarização VV). As quatro áreas testes escolhidas correspondem a ambientes fisiográficos distintos (vegetação, relevo, geologia, solos, etc.) e parcialmente representativos da diversidade da região Amazônica.

O sistema SAR utilizado no **SAREX** é capaz de imagear em três modos: Nadir, Faixa Estreita (Narrow Swath) e Faixa Larga (Wide Swath). Com a aeronave operando a uma altitude de 6 Km, imagens na banda C, com polarizações VV e HH, de elevada resolução (6m x 6m) foram geradas sob ângulos

de depressão de 16 a 90 graus (Nadir) e 14 a 45 graus (Faixa Estreita). O modo Nadir é mais adequado no imageamento de terrenos com relevo acentuado ou para simulação de geometria de SAR orbital. Imagens de baixa resolução (20m x 10m) foram também obtidas através da Faixa Larga, com ângulos de depressão variando de 5 a 45 graus. A figura 4 mostra as características dos 3 modos de operação utilizados no **SAREX**.

Na Província Mineral de Carajás foram imageadas em Abril de 1992, com elevada resolução, as áreas mineralizadas em cobre do Salobo e Pojuca, em ouro do Bahia e em ferro do N1 (modo Nadir). Além disso, um grande recobrimento regional, com imageamento de mais baixa resolução (Faixa Larga), foi conduzido, abrangendo desde a Serrania de Carajás (Serra Sul), até os limites norte da Hidreleétrica de Tucuruí. Na figura 5 é apresentada a localização das faixas de imageamento para a área teste de Carajás. As faixas Bra 4.1 a 4.5 correspondem ao imageamento regional (Faixa Larga), com elemento de resolução de 20m (range) por 10m (azimute) e 63 km de largura de faixa.. As faixas Bra 2.3, Bra 2.4 e Bra 2.5, foram imageadas no modo Nadir (22 km de largura de faixa), com elemento de resolução de 6m x 6m, e dispostas segundo as órbitas ascendentes e descendentes do ERS-1 para efeito de simulação e comparação. A faixa Bra 2.3 cobre parte do Rio Itacaiúnas e as mineralizações do Pojuca e N1. A faixa Bra 2.4, paralela a anterior, cobre a área do Salobo. Finalmente a faixa Bra 2.5, com 24 graus de diferença de posicionamento das anteriores, cobre as áreas do Salobo e do Bahia.

Cabe ainda salientar dois aspectos: (1) devido a pane no sistema, não foi possível adquirir a faixa Bra 2.1, que cobriria a área de Pojuca, no modo Nadir e paralela a Bra 2.5 e o final da faixa regional Bra 4.4, no extremo sul de Carajás, na confluência dos rios Catete e Itacaiúnas; (2) como as estruturas regionais na borda norte da Serrania de Carajás (região do Pojuca) estão dispostas segundo N70W, foi também imageada a faixa Bra 2.2 nesta orientação e com visada para SW no modo Faixa Estreita (resolução de 6m x 6m). Esta faixa com 18 km de largura e cobrindo as mineralizações do Azul (Mn), N1 (Fe), do Pojuca (Cu-Zn) e do Salobo (Cu-Au-Mo-Ag), possibilitará investigar os efeitos da variação de visada frontal no realce de estruturas regionais, na discriminação litológica, na análise estrutural de detalhe e na caracterização de classes geobotânicas, detectadas pelo TM-Landsat 5, com iluminação solar de orientação similar (Paradella 1992). A figura 6 mostra a disposição das áreas imageadas no SAREX' 92 para Carajás e Tucuruí e a localização das órbitas ascendentes e descendentes do ERS-1 para efeito de estudos de comparação.

Esta quantidade enorme de dados, na forma de fitas magnéticas (8 bits), transparências e imagens em papel fotográfico, será analisada no contexto de aplicações geológicas (estudos estruturais e tectônicos, discriminações litológicas, geobotânica, etc.); pesquisa em sensores remotos (modelagem de respostas de retroespalhamento de alvos tropicais como vegetação, crostas ferruginosas/cangas, etc.), comparação

de sistemas sensores (ERS-1, TM-Landsat, SPOT, RADARSAT, etc.), integração de dados (sensores remotos, aerogeofísicos, topográficos, etc.) e estudos ambientais. O experimento é coordenado pelo INPE, com participação do CCRS (Canada Centre for Remote Sensing), DOCEGEO e Museu Paraense Emílio Goeldi. A investigação será parcialmente financiada pela CIDA (Canadian International Development Agency) com duração do projeto até 1997.

#### 4. O Experimento AIRSAR

O Experimento AIRSAR está inserido em um programa maior da NASA, o SIR-C (Shuttle Imaging Radar), visando o imageamento orbital de áreas do planeta por SAR. A missão com o AIRSAR (sistema SAR em aeronave da NASA) para 1993, preve o sobrevôo de várias áreas no Brasil, com uma aeronave DC-8. O AIRSAR permite a aquisição simultânea de dados digitais em três frequências (C, L e P) e com ângulos de visada variáveis de 22 graus (near range) e 54 graus (far range). O centro do ângulo de incidência é de aproximadamente 40 graus e largura da faixa da ordem de 9 kms. Embora qualquer combinação de polarização transmitida e recebida possa ser simulada através da capacidade polarimétrica do AIRSAR, dados paralelos e cruzados são os normalmente produzidos (HH, HV, VH e VV). Maiores detalhes sobre as características do AIRSAR podem ser vistos em Van Zyl et al. (1992). Um exemplo de aplicação deste tipo de dados em estudo de ambiente árido pode ser visto em Lancaster et. al (1992).

Uma das áreas propostas e aprovadas para sobrevôo do

**AIRSAR** em Junho de 1993 no Brasil, foi o Baixo Vale do Rio Curaçá, Bahia. Em ambiente tropical semi-árido como o do Vale do Curaçá, as características de alteração, com o desenvolvimento de pavimentos, de solos rasos, a geomorfologia, etc., são em grande parte controladas pela litologia e estrutura. Em adição, a cobertura vegetal de "caatinga", tende a apresentar um relacionamento próximo com variações da paisagem, no qual o atributo geológico exerce um controle primário. Assim, variações florísticas e de fisionomia vegetal (principalmente de densidade de recobrimento), fornecem interessantes padrões geobotânicos, que tem sido explorados em mapeamento geológico e discriminação litológica via sensores ópticos (Paradella 1986).

Como o **AIRSAR** fornecerá medidas da interação das microondas com a superfície em 3 frequências, diferentes escalas de rugosidade de superfície serão amostradas. Em adição, correlações de intensidade de retroespalhamento vs. umidade poderão ser avaliadas, como também investigadas as variações de penetração na cobertura vegetal e na interface solo/rocha alterada. Por último, devido à possibilidade de obtenção de imagens com diferentes ângulos de incidência, o papel da geometria sensor/alvo poderá ser analisado. Na figura 7 é apresentada a localização da área proposta para recobrimento com o **AIRSAR** na Bahia. Dois sobrevôos estão sendo propostos com orientação Leste-Oeste e visada para Sul e com dois ângulos de incidência de 22 e 54 graus.

Em síntese, o experimento

**AIRSAR** no Vale do Curaçá abrangerá estudos da resposta do retroespalhamento detectadas no contexto de discriminação litológica, pesquisa geobotânica, caracterização estrutural e geomorfológica, bem como estudos de modelagens em microndas, integração de dados e correlações quantitativas com umidade e rugosidade medidas no terreno. A investigação no Curaçá é uma proposta conjunta INPE com o DRI (Desert Research Institute), da Universidade de Nevada (Reno) e com a participação do Instituto de Geociências da UnB.

## 5. Conclusões

O entendimento dos mecanismos de interação entre a onda eletromagnética e os diferentes alvos na superfície é vital para que possa ser extraído o máximo de informação pelo geocientista. No caso particular de dados **SAR** de ambientes tropicais, o impacto das novas características de frequência, polarização e geometria de imageamento, carece de avaliação. Este aspecto é crítico na busca do melhor uso desta tecnologia no conhecimento e monitoramento dos recursos naturais de nosso território. Através destes dois projetos, com características de desenvolver capacitação, gerar conhecimento e formar recursos humanos a nível de pós-graduação neste tema, espera-se uma efetiva contribuição na avaliação de dados **SAR** para ambientes tropicais variados (úmido e semi-árido), dentro do contexto de aplicação geológica e estudos do ambiente.

## Agradecimentos

O autor expressa seus

agradecimentos ao colega Ulf Walter Palme pela revisão crítica e sugestões ao texto e a Silvio P. Coimbra e Joaquim Godoy Filho pelas artes gráficas.

## Referências

Evans, D. L. 1992 Geologic Process Studies Using Synthetic Aperture Radar (SAR) Data. *Episodes*, 15 (1): 21-31.

JPL (Jet Propulsion Lab) 1982 **The SIR-B Science Plan**. JPL, Relatório Técnico, p. 82-78.

Lancaster, N.; Gaddis, L.; Greeley, R. 1992 New Airborne Imaging Radar Observations of Sand Dunes: Kelso Dunes, California. *Remote Sensing of Environment*, 39: 233-238.

NASA 1988 **SAR/Earth Observing System** (Instrument Panel Report), Vol. IIf, Washington, 233p.

Paradella, W. R. 1986 O Significado Litológico da Informação Espectral e Temporal (Sazonal) de Dados Digitais MSS do Satélite Landsat 3 para o Baixo Vale do Rio Curaçá, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 16 (2): 135-148.

Paradella, W. R. 1992 A GIS and a Geobotanical Investigation Based on TM-Landsat and DEM for Geological Mapping in the Tropical Rain Forest Environment (Brazilian Amazon Region). *IGARSS' 92*, Houston, USA, Vol. I, p. 631-633.

Singhroy, V. H. 1992 Radar Geology: Techniques and Results. *Episodes*, 15 (1): 15-20.

Ulaby, F. F.; Moore, R.K.; Fung, A. K. 1982 **Microwave Remote Sensing: Active and Passive**. Reading, MA, Addison-Wesley Ed., 1064p.

Van Zyl, J.; Carande, R.; Lou, Y.; Miller, T.; Wheeler, K. 1992 The NASA/JPL Three-Frequency Polarimetric AIRSAR System. *IEEE*, 649-651p.

Werle, D. 1989 **Radar Remote Sensing for Application in Forestry**. CCRS, Ottawa, Canadá, 42p.

Wooding, M. G.; Attema, E. P. W. 1992 **SAREX'92 (South American Radar Experiment)**. Experimenters Handbook. ESA, Noordwijk, The Netherlands. 49p.

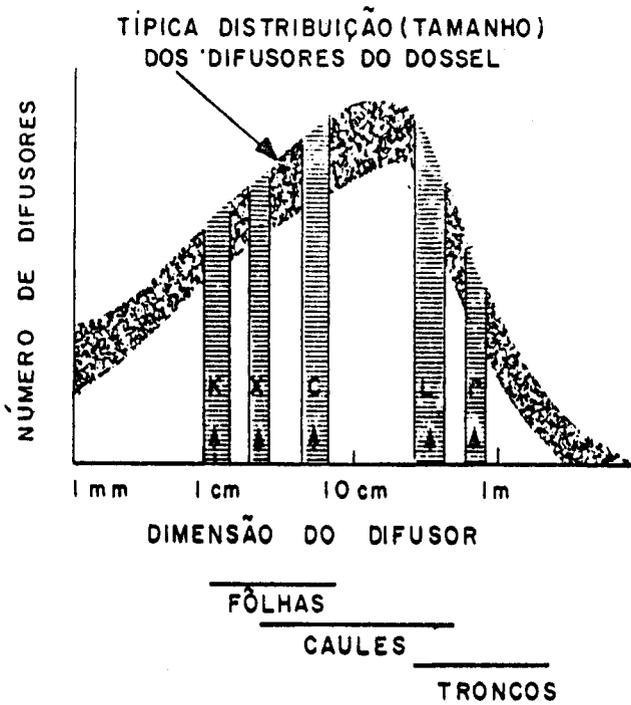


Figura 1: Resposta de radar esperada em vários comprimentos de onda em relação a distribuição (tamanho) de difusões presentes no dossel.  
 FONTE: NASA, 1988.

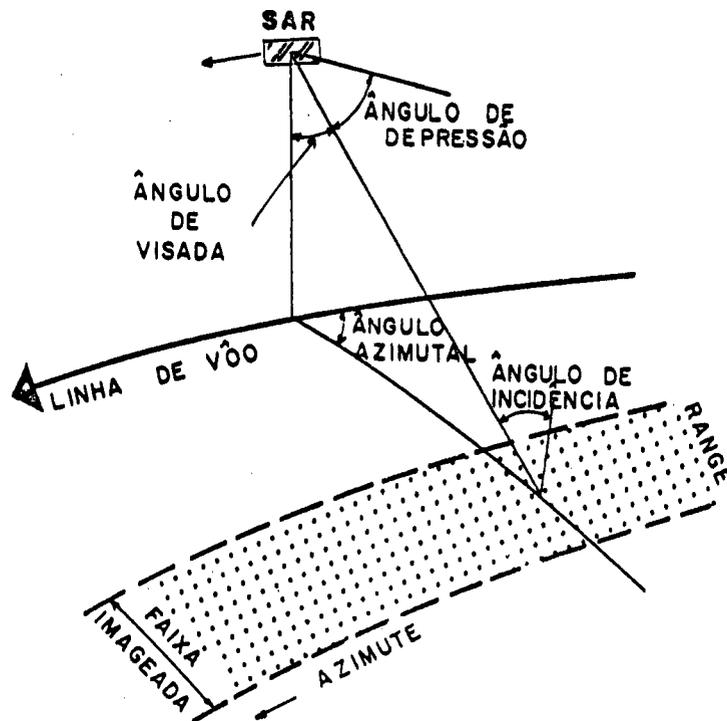


Figura 2: Definições angulares em radar.  
 FONTE: JPL, 1982.

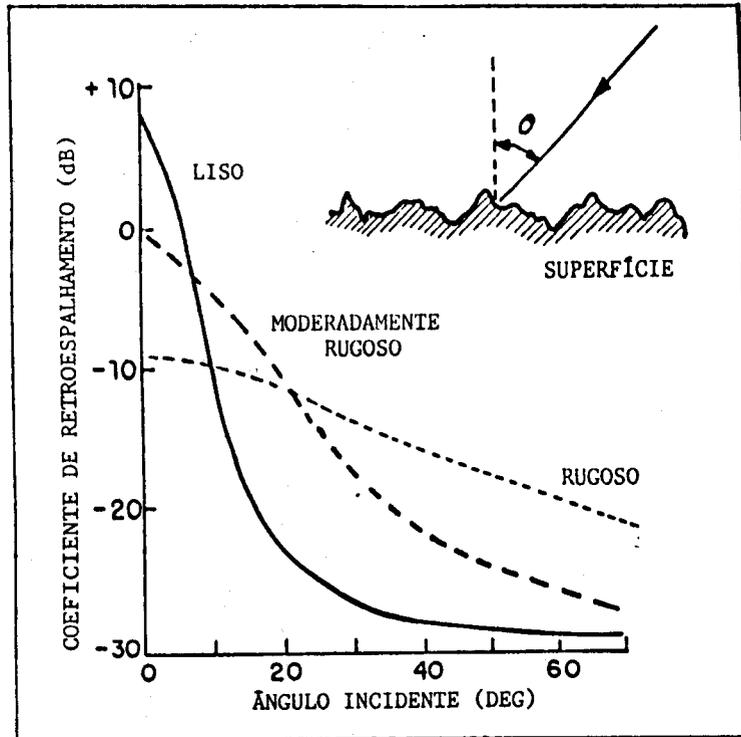


Figura 3: Curvas características de retroespalhamento por ângulo de incidência para superfícies lisas, moderadamente rugosa e rugosa.

FONTE: NASA, 1988.

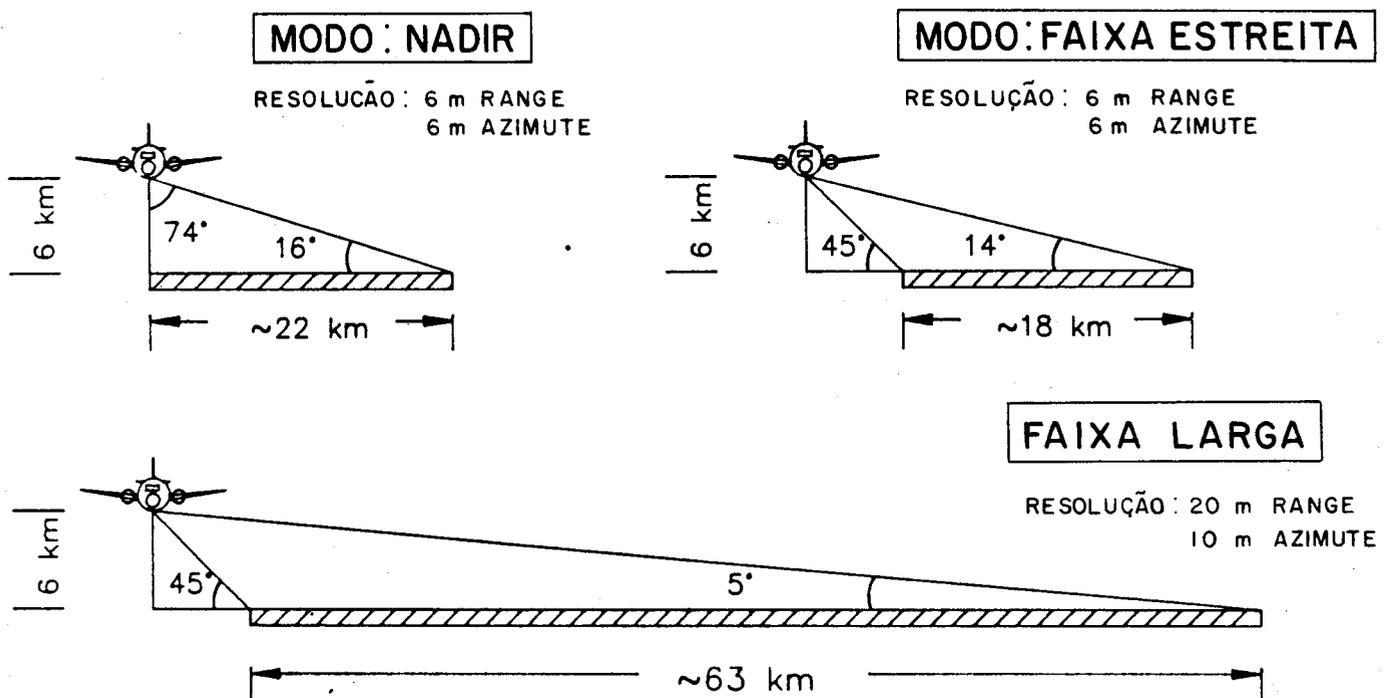


Figura 4: Modos de operação do SAR usados no SAREX'92.

# SAREX'92 (CARAJÁS-TUCURUÍ)

(SOUTH AMERICAN RADAR EXPERIMENT - INPE-CCRS)

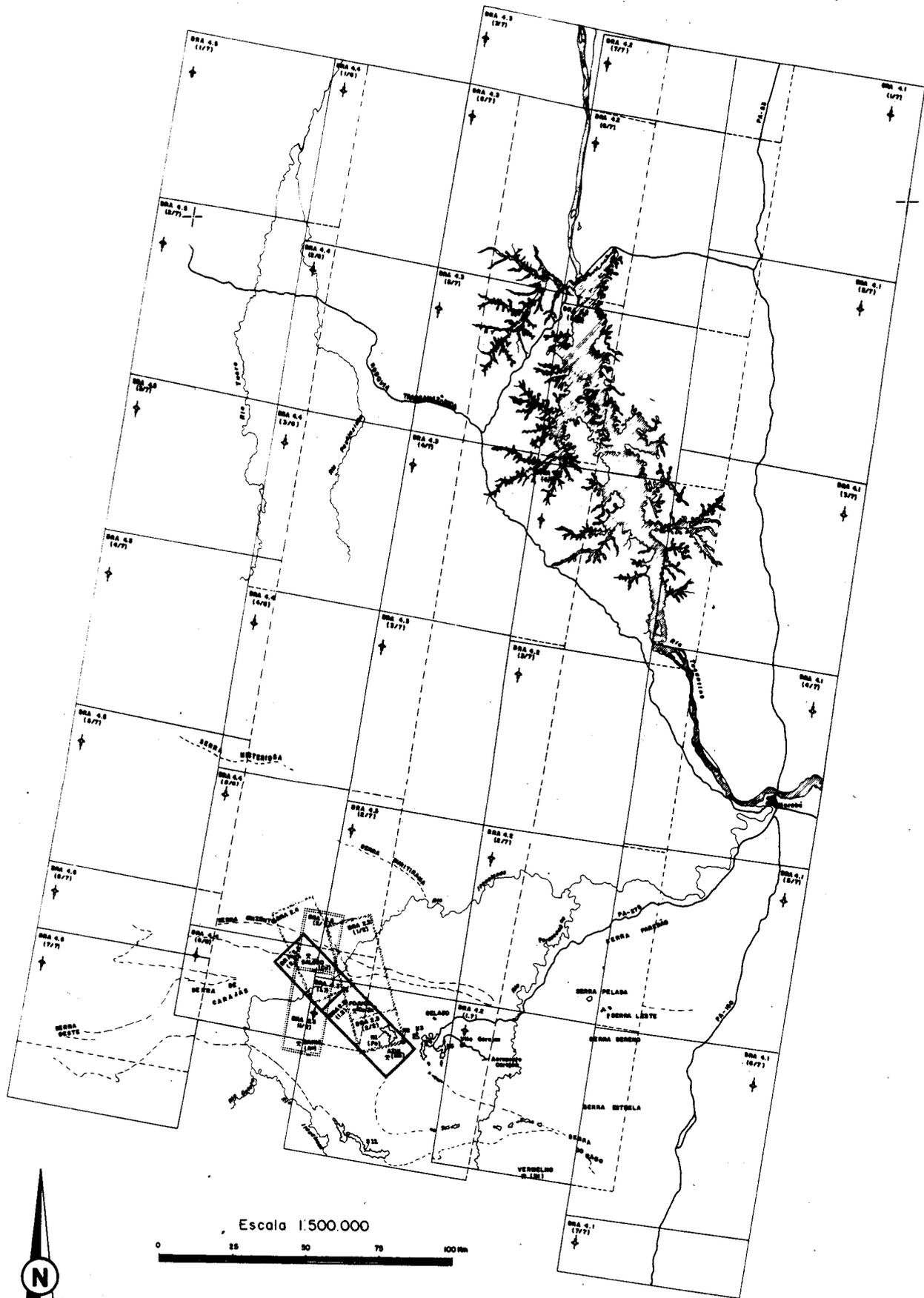


Figura 5: Áreas imageadas na região de Carajás no SAREX' 92 .

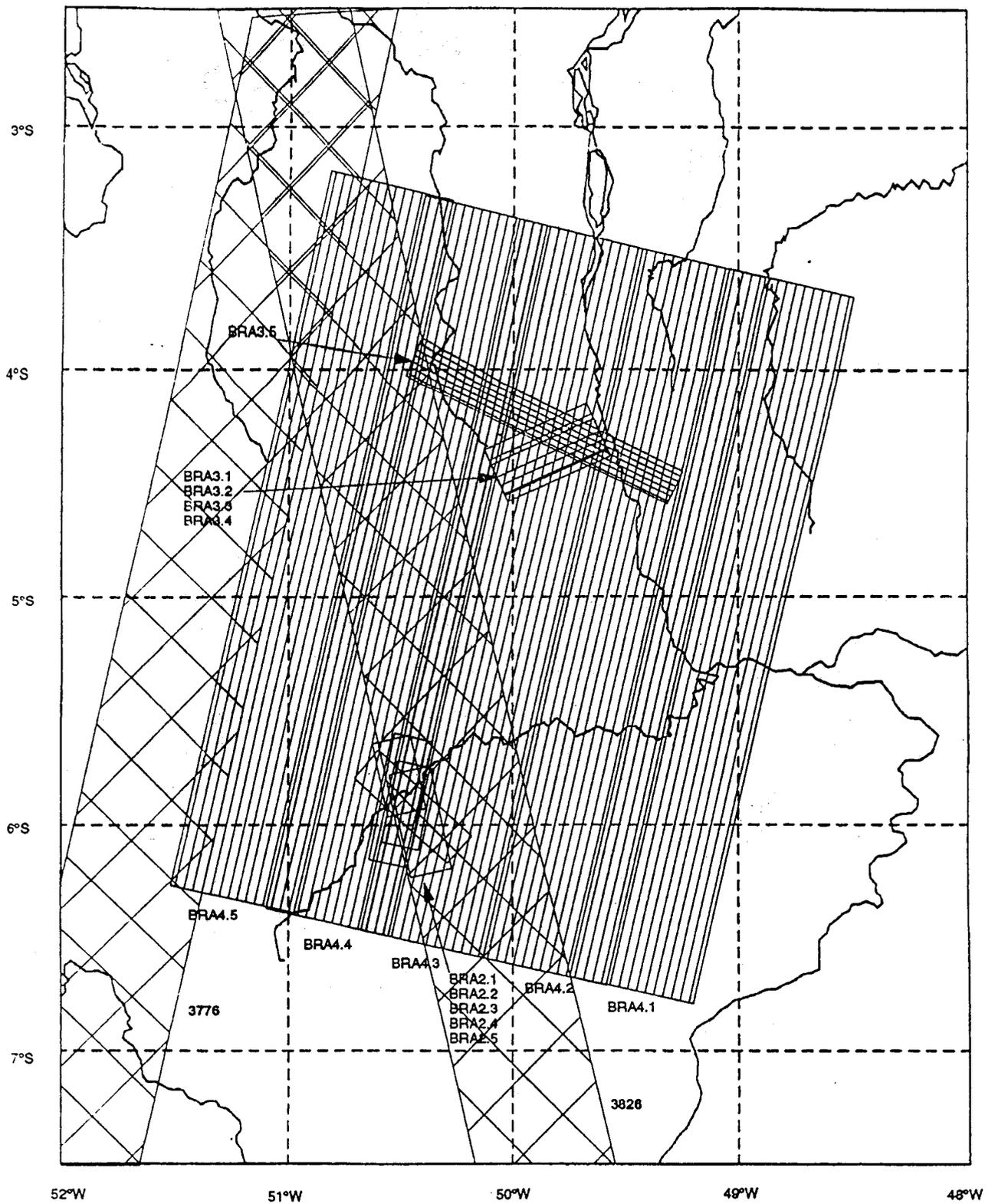


Figura 6: Áreas imageadas em Carajás e Tucuruí no SAREX'92 e orbitas do ERS-1.

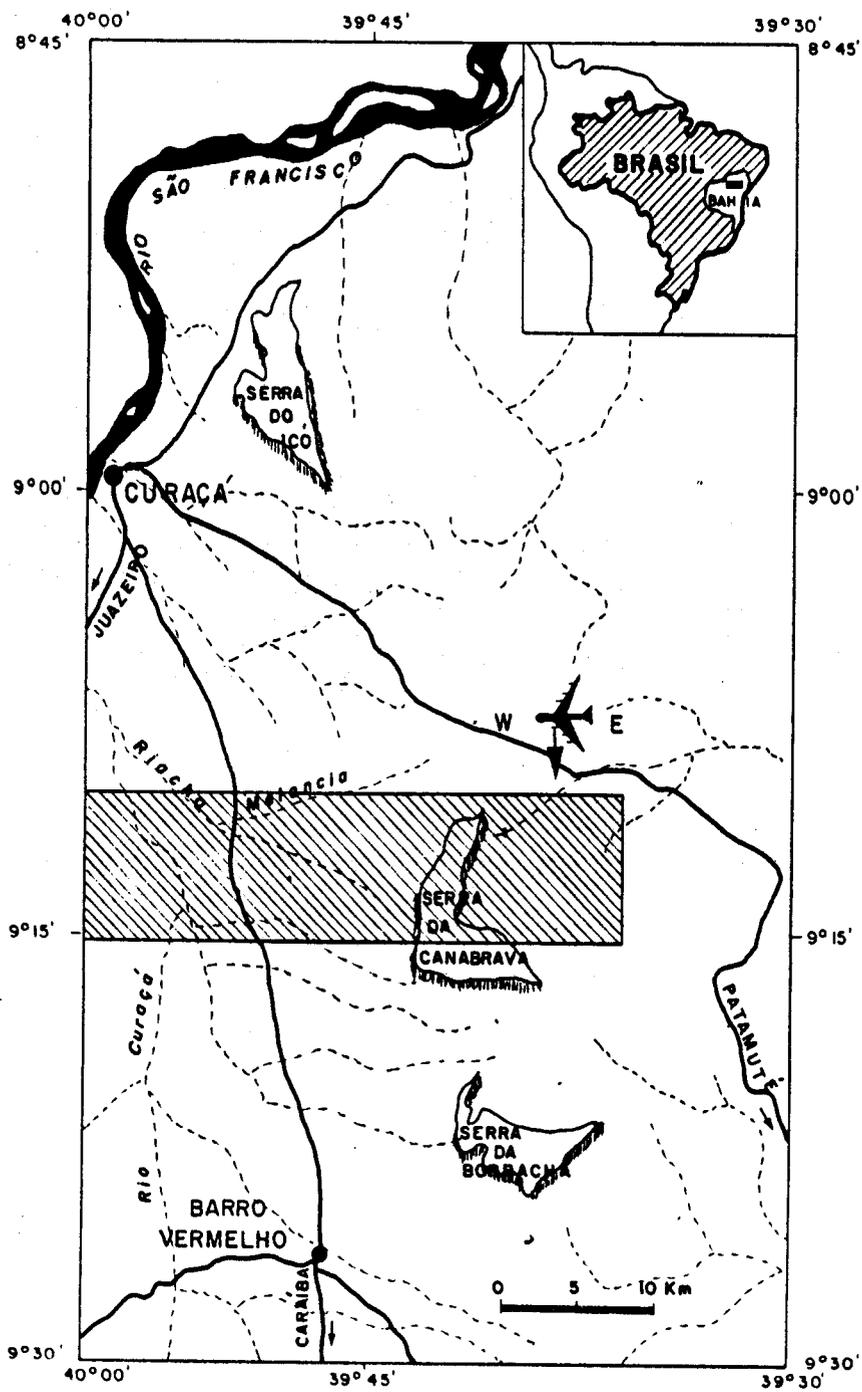


Figura 7: Área proposta para sobrevôo com o AIRSAR no Vale do Curaçá, Bahia.