

Análise dos valores de retroespalhamento de imagens RADARSAT, com diferentes ângulos de incidência e azimutes de visada, na separabilidade litológica do Vale do Rio Curaçá (Ba)

Sheila Soraya Alves Knust¹
Tiago Nunes Rabelo¹
Waldir Renato Paradella¹
Athos Ribeiro dos Santos¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{knust, tiago, waldir, athos}@ltid.inpe.br

Abstract. SAR Imagery has been used widely for geological interpretation and mapping over different scenarios and conditions. In particular, at difficult access areas, it is an invaluable tool with need of research evaluations and suitability approaches. This work evaluated, quantitatively, the influence of incidence angle and azimuth look-direction for lithological discrimination at flat terrain conditions in a semi-desertic region, located in the Brazilian Northwest. Orthorectified RADARSAT images (S2A, S7A e S7D modes) were converted to sigma zero values and conducted several statistic analyzes. Results showed that imagery with single azimuth look-direction were suitable for lithotype discrimination at increasing incident angles. Constant incident angle with variations of look-direction azimuth (descending orbit) characterized properly the rock types in the region.

Palavras-chave: remote sensing, SAR, roughness, backscatter, geology, sensoriamento remoto, rugosidade, retroespalhamento, geologia.

1. Introdução

O imageamento por sensores radares tem mostrado eficiência em estudos de cunho geológico, devido à sua geometria de visada lateral e à frequência pelo qual operam. As imagens obtidas através desses sensores realçam a topografia (macro-relevo) e a rugosidade superficial, fornecendo desta forma valiosas informações geológicas, tais como o realce de estruturas, de unidades litológicas e de padrões geobotânicos (Paradella e Vitorello, 1995). Neste contexto, a investigação aborda de forma quantitativa os valores de retroespalhamento (σ_0) das imagens RADARSAT-1 em diferentes modos de imageamento, variando o ângulo de incidência e o azimute de visada. O estudo objetivou, através de análises estatísticas apropriadas, fazer uma avaliação prévia da capacidade de separação litológica considerando os parâmetros do sensor e do alvo.

2. Fundamentação

O radar imageador é um sensor de rádio-frequência baseado nas propriedades elétricas e geométricas dos alvos. É um sistema imageador ativo, onde se tem que uma determinada quantidade de energia eletromagnética emitida pelo sensor, é retroespalhada pelos alvos e registrada pelo sistema. Desta forma, os radares são capazes de operar tanto de dia quanto à noite, e devido ao maior comprimento de onda utilizado, são de grande utilidade em regiões com condições climáticas e ambientais adversas.

O entendimento da interação da energia eletromagnética com os alvos, bem como dos parâmetros envolvidos, é necessário a fim de aumentar a qualidade e confiabilidade das interpretações. Segundo Ford *et al.* (1998), os principais parâmetros que condicionam o

retroespalhamento do radar estão relacionados ao sistema sensor (comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência, azimute de visada e resolução espacial) e aos alvos (rugosidade da superfície, constante dielétrica e orientação dos alvos).

Estudos de Singhroy e Saint-Jean (1999), mostram que a variação do ângulo de incidência em imagens do sensor RADARSAT-1 realçam as feições do terreno baseado no tipo de relevo e na textura da superfície. Para relevos planos a pouco acidentado, os ângulos de incidência menores tendem a produzir um maior realce do relevo, porém ângulos maiores resultam em uma melhor caracterização do terreno, pelo aumento do contraste textural produzido.

O azimute de visada também deve ser levado em consideração em estudos geológicos, já que os melhores resultados são obtidos quando estes estão perpendiculares às feições analisadas, tais como os traços estruturais (fraturas, falhas e lineamentos).

A rugosidade superficial é um importante atributo na análise do terreno, e reflete a natureza do substrato geológico, o tipo de solo e a cobertura vegetal (Grunsky,2002). A macrorugosidade é controlada pelas mudanças na macrotopografia, e é relacionada com as grandes estruturas e com o relevo. Já a microrugosidade refere-se à rugosidade superficial determinada pelas feições texturais superficiais. Este tipo de rugosidade está relacionada com a magnitude do retroespalhamento do radar dentro da célula de resolução (Ford et al., 1998).

Existem diversos níveis de aproximação que caracterizam a rugosidade da superfície (Lewis e Henderson, 1998). A aproximação definida pelo Critério de Rayleigh, supõe que as irregularidades da superfície são expressas em função das variações de altura da superfície pelo erro quadrático médio das variações verticais do terreno (h_{rms}), pelo comprimento de onda (λ) e pelo o ângulo de incidência (θ). De acordo com o Critério de Rayleigh, uma superfície é rugosa se:

$$h_{rms} > \lambda / 8 \cos \theta$$

3. Área de Estudo

O Vale do Rio Curaçá localiza-se ao norte do estado da Bahia (**Figura 01**), e é uma região de interesse econômico devido às mineralizações de cobre existentes em alguns corpos máficos-ultramáficos. Apresenta relevo plano, clima semi-árido, vegetação esparsa de caatinga, e abundante exposição de solo, o que favorece o estudo direto da interação energia-solo /rocha. Segundo Paradella e Vitorello (1995), os solos da região são predominantemente residuais de composição, textura e cor variáveis, de acordo com a rocha subjacente que lhes deu origem.

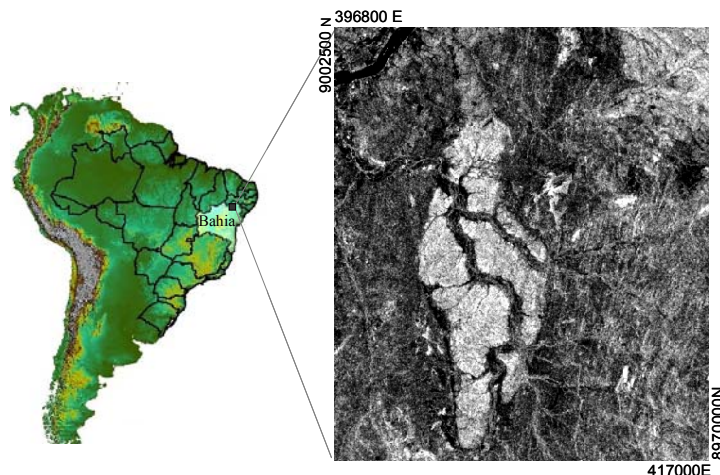


Figura 01 – Localização da área de estudo, Curaçá (Ba). Imagem RADARSAT-1, modo S2A.

Geologicamente localizada no embasamento norte do Cráton São Francisco, e inserida no Cinturão Salvador-Curaçá, a área de estudo compreende dois grupos com ciclos tectono-orogênicos distintos: O Grupo Caraíba e o Grupo Canudos, ambos sobrepostos pelos depósitos de idade recente (Delgado e Souza, 1981).

O Grupo Caraíba é constituído por gnaisses, migmatitos, rochas máficas-ultramáficas e granitóides associados, enquanto que o Grupo Canudos é composto essencialmente por rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico.

4. Materiais

Neste estudo foram analisadas três imagens do satélite RADARSAT-1, satélite canadense que opera com frequência de 5,3 Ghz (5,6 cm de comprimento de onda) e polarização HH. As imagens são do modo Standard, e possuem diferentes ângulos de incidência e azimutes de visada. As características das imagens são resumidas na **Tabela 1**.

Tabela 01 – Características gerais dos dados RADARSAT-1 utilizados.

Sensor	Data de Aquisição	Ângulo de Incidência	Resolução Aproximada	Sentido da Órbita	iluminação (azimute)
RADARSAT Standard Mode Beam 2A	17/set/03	24 – 31°	25m	Ascendente	78°
RADARSAT Standard Mode Beam 7A	14/out/03	45 – 49°	25m	Ascendente	78°
RADARSAT Standard Mode Beam 7D	22/out/03	45 – 49°	25m	Descendente	282°

Para estas datas de aquisição, a influência da constante dielétrica é praticamente inexistente, devido aos baixíssimos índices pluviométricos (Embrapa Semi-Árido) registrados na região antes e durante a aquisição das imagens.

5. Método de Trabalho

Para o pré-processamento das imagens utilizou-se o software PCI versão 10. Primeiramente, fez-se a conversão das imagens em amplitude para valores de retroespalhamento σ_0 (decibéis), utilizando-se dos algoritmos *sarincd* (para o cálculo dos ângulos de incidência da colunas das imagens) e o *sarsigma*. Antes de fazer esta conversão, aplicou-se o filtro adaptativo *Enhanced Frost*, janela 7x7 na imagem amplitude, objetivando a redução do ruído *speckle*.

Para a correção geométrica das imagens foram coletados pontos de controle (PCs) na carta topográfica na escala 1:100000 (SC. 24-V-D-II), e o modelo digital de terreno extraído da própria carta. Para a imagem S2A foram locados 23 pontos de controle, com erro quadrático médio (RMS) de 24,13 m. As imagens S7A e S7D foram corrigidas com 21 e 22 pontos de controles, com RMS de 22,91 e 23,86 metros respectivamente.

Das imagens ortoretificadas, foram extraídos os valores digitais (σ_0) provenientes de 24 amostras, correspondentes a 12 litotipos diferentes. Cada amostra consistia em uma matriz de tamanho 5x5, no qual posteriormente foram escolhidos aleatoriamente os valores de sigma zero para cada litotipo (25 pixels para cada litotipo), garantindo desta forma a independência dos dados. Esses pontos apresentam medidas de rugosidade de campo, que foram tomadas sistematicamente na direção ortogonal à direção de iluminação. A metodologia aplicada no tratamento dos dados de campo é descrita em Ulaby e Batlivala (1976), e a caracterização da rugosidade superficial foi estabelecida através do Critério de Rayleigh.

Os parâmetros estatísticos das amostras foram calculados, e o teste-t heterocedástico foi aplicado, uma vez que este é indicado para amostras com variâncias diferentes. As análises estatísticas foram realizadas par a par, e sua execução foi a partir dos programas Excel e Statistica 6.0.

6. Análise e Discussões

Na **Tabela 2**, constam as médias dos coeficientes de retroespalhamento para cada litotipo e o seu respectivo desvio padrão.

Tabela 02 – Coeficientes de retroespalhamento e desvio padrão para os litotipos analisados.

Litotipo	S2A		S7A		S7D	
	σ_0 (db)	desvio padrão	σ_0 (db)	desvio padrão	σ_0 (db)	desvio padrão
Mica-xisto	-3,776	0,602	-5,172	0,491	-5,702	0,714
Aluvião	-6,840	0,519	-8,993	0,582	-8,677	0,556
Quartzo feldspato gnaise	-6,895	0,377	-8,481	0,770	-9,723	0,469
Dique básico	-7,462	0,502	-8,649	0,392	-7,888	0,573
Migmatito	-7,773	0,342	-10,004	0,534	-9,540	0,450
Piroxenito	-7,715	0,817	-10,008	0,865	-9,036	0,450
Quartzito Ferruginoso	-8,042	0,576	-10,100	0,473	-7,069	0,892
Anfibolito	-8,077	0,813	-10,478	0,449	-9,766	0,306
Biotita hiperstênio gnaise	-8,484	0,580	-9,602	0,558	-9,723	0,469
Biotita hornblenda gnaise	-8,711	0,695	-12,092	0,832	-11,316	0,780
Cobertura areno argilosa	-10,292	0,556	-12,017	0,583	-10,341	0,671
Filito	-10,551	0,654	-12,104	1,563	-12,425	1,233

Mantendo-se o mesmo azimute de visada (imagens S2A e S7A), observa-se que a imagem S2A é a que apresenta os maiores coeficientes de retroespalhamento. Este resultado é coerente, já que para relevo plano o retroespalhamento é maior quanto menor for o ângulo de incidência (Henderson e Lewis, 1998).

No caso das imagens S7A e S7D, no qual se tem a situação oposta (mesmo ângulo de incidência, e azimutes de visadas diferentes), os valores de σ_0 encontram-se relativamente próximos, e em geral são maiores na imagem com órbita descendente.

Os valores de retroespalhamento são função basicamente dos parâmetros dos alvos. Como dito anteriormente, a influência da constante dielétrica é muito pequena e restrita a regiões próximas as drenagens, de forma que a rugosidade superficial é o principal parâmetro responsável pelos valores de σ_0 . A tabela V corrobora com esta afirmação.

Tabela 03 – Erro quadrático médio das variações verticais do terreno para as imagens ascendentes e descendente, e o Critério de Rayleigh calculado.

Litotipo	h_{rms} (ascendente)	h_{rms} (descendente)	Rayleigh S2A	Rayleigh S7A	Rayleigh S7D	Conclusão
Mica-xisto	1,444	1,115	0,786	1,003	1,034	rugoso
Aluvião	0,289	0,291	0,784	1,001	1,044	liso
Quartzo feldspato gnaise	1,236	1,535	0,794	1,011	1,031	rugoso
Dique básico	1,011	1,051	0,790	1,007	1,037	rugoso
Migmatito	0,500	0,654	0,791	1,008	1,035	liso
Piroxenito	1,411	1,340	0,788	1,005	1,036	rugoso
Quartzito Ferruginoso	1,736	1,913	0,780	0,996	1,047	rugoso
Anfibolito	0,729	0,812	0,788	1,005	1,037	liso
Biotita hiperstênio gnaise	0,725	0,546	0,793	1,010	1,033	liso
Biotita hornblenda gnaise	0,492	0,436	0,789	1,006	1,036	liso
Cobertura areno argilosa	0,345	0,328	0,782	0,999	1,044	liso
Filito	0,311	0,361	0,793	1,010	1,040	liso

O mica-xisto é consideravelmente o litotipo que apresenta os maiores valores de σ_0 em todas as imagens. Esse destaque deve-se principalmente ao espalhamento volumétrico, dado pela grande quantidade de vegetação seca presente nesta região em especial. Os demais litotipos possuem valores de retroespalhamento mais homogêneos entre si, pois possuem densidade de vegetação mais constante (vegetação esparsa) e valores de h_{rms} mais próximos. A cobertura areno argilosa e o filito são caracterizados em campo pela escassez de vegetação e por apresentar baixos valores de h_{rms} , o que reflete nos baixos valores de σ_0 .

Com relação à análise da separabilidade dos litotipos em cada imagem, é apresentada a **Figura 2**. Estes gráficos foram gerados a partir dos resultados obtidos pelo teste-t heterocedástico, aplicado a cada par de litotipo.

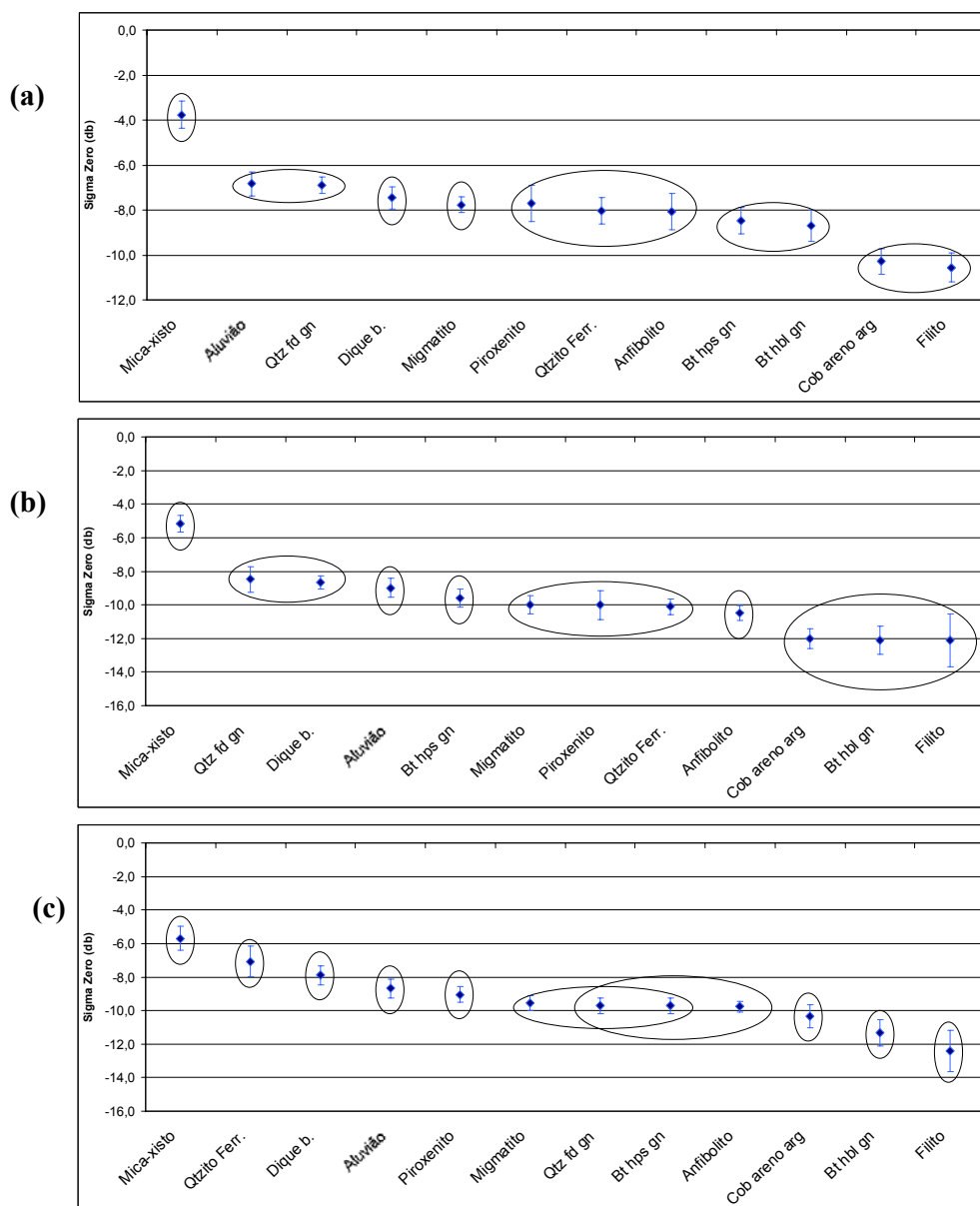


Figura 02 – Coeficiente de retroespalhamento σ_0 versus litotipos analisados. Os círculos indicam os litotipos que apresentaram médias iguais pelo teste-t. **(a)** Resultados com a imagem S2A; **(b)** imagem S7A; **(c)** imagem S7D.

Na imagem S2A foi possível separar um conjunto de sete litotipos diferentes, sendo que apenas os litotipos mica-xisto, dique básico e migmatito foram caracterizados individualmente. Segundo o teste-t, com nível de significância de 5%, o aluvião e quartzo feldspato gnaiss rejeitam a hipótese de médias de σ_0 diferentes, bem como os outros três domínios representados na **Figura 2a**.

Com relação à separabilidade da imagem S7A (**Figura 2b**), caracterizaram-se também sete conjuntos de litotipos. Entretanto, o número de litotipos individualizados foi maior (mica-xisto, aluvião, biotita hiperstênio gnaiss e anfibolito) que na imagem S2A.

A imagem S7D foi a que apresentou a melhor delimitação dos litotipos, como pode ser observado na **Figura 2c**. Apenas um conjunto restrito de litotipos foi sobreposto, sendo que a grande maioria aceitou a hipótese de médias diferentes.

7. Conclusões

Para fins de mapeamento litológico, a análise quantitativa dos valores de retroespalhamento (σ_0) foi bastante satisfatória com nível de significância de 5%. Isto se deve em grande parte pela escassez da vegetação e abundante exposição de solo na região, o que favorece o estudo direto da interação energia-rocha/solo.

Mantendo-se constante o azimute de visada, e variando-se apenas o ângulo de incidência das imagens (S2A e S7A), houve uma melhora na separabilidade de litotipos. Este resultado reforça o fato de que para relevo plano, a utilização de imagens com ângulos de incidências maiores fornecem maior quantidade de informação geológica, devido ao maior contraste textural.

No caso de fixação do ângulo de incidência e variação do azimute de visada (S7A e S7D), a imagem com órbita descendente foi a que apresentou melhor resultado. Os traços estruturais e as principais orientações das feições de relevo foram realçadas com o azimute de visada de 282°, devido à perpendicularidade entre os mesmos.

Por fim, recomenda-se a utilização de imagens SAR com diferentes datas de aquisição, afim de que se possam acrescentar informações relativas à constante dielétrica. Acredita-se que os pequenos corpos de piroxênio, os principais hospedeiros de cobre, serão mais bem delimitados devido à maior retenção de água nos mesmo e conseqüente aumento do coeficiente de retroespalhamento.

Referências

Delgado, I. M.; Souza, J. D. **Projeto cobre-Curaçá: geologia econômica do Distrito Cuprífero do Rio Curaçá-Bahia-Brasil**. Convênio Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais/Departamento Nacional de Produção Mineral. Salvador, CPRM, 1975. 30p.

Embrapa Semi-Árido. Disponível em: <<http://www.cpsa.embrapa.br/>>. Acesso em: 18 fev. 2006.

Ford, J. P.; Blom, R. G.; Coleman, J. R.; Farr, J. J.; Plaut, H. A.; Pohn, F. F.; Sabins, J. R. Radar Geology. In: Henderson, P.M.; Lewis, A. J. (ed.). **Manual of remote sensing: Principles & Applications of Imaging Radar**. New York, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. cap. 10, p. 511-565.

Grunski, E. C. The application of principal components analysis to multi-beam RADARSAT-1 satellite imagery: A tool for land cover and terrain mapping. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 758-769, Dec 2002. Disponível em: <<http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cjrs/rs6-02.html>> Acesso em 2 fev 2005.

Lewis, A. J., Henderson, P.M., Holcomb, D.W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: Henderson, P.M.; Lewis, A. J. (ed.). **Manual of Remote Sensing: Principles & Applications of Imaging Radar**. New York, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. cap. 3, p. 131-181.

Paradella, W.R.; Vitorello, I. Geobotanical and soil spectral investigation in the “caatinga” environment (Brazil) Base on multitemporal remote sensing data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.21, n.1, p. 52-59, Mar 1995.

Singhroy, V.; Saint-Jean, R. Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 3, p. 211-217, Aug. 1999.

Ulaby, F.T. e Batlivala, P.P. Optimun radar parameters for mapping soil moisture. **IEEE Transations Geoscience Eletronics**, v. 14, n. 2, p. 81-93. Apr. 1976.