Avaliação de dados polarimétricos ALOSPALSAR para discriminação litológica no Vale do Rio Curaçá – BA utilizando técnicas de decomposição de alvos

José Carlos Ribeiro [1]
Waldir Renato Paradella [1]
Arnaldo de Queiroz da Silva [2]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{jose, waldir}@dsr.inpe.br

[2] Universidade Federal do Pará - Instituto de Geociências - UFPA
Caixa Postal 1611 - 66075-110 - Belém - PA, Brasil
arnaldoq@ufpa.br

Abstract. This paper focuses on the assessment of the L-band polarimetric data from PALSAR sensor (ALOS satellite) aiming at the discrimination of different lithotypes in a Brazilian semi-arid terrain. In this study we evaluated two different techniques of polarimetric data classification based on target decomposition theory: the Cloude-Pottier and the Freeman-Durden models coupled with Wishart unsupervised classification. The study area is located in the lower Curaçá valley, an important Cu-rich district of the Bahia state. The site is characterized by a flat terrain, with moderate to sparse caatinga vegetation and shallow residual soils closely related to changes in the geological substratum. The area is part of the São Francisco Craton and encompasses paleoproterozoic granulitic and gneissic rocks and an intrusive sequence of mafics and ultramafics. Subordinately, metasediments with neoproterozoic ages also occur. The classification units were essentially associated to three broad classes: (1) gneisses+migmatites, (2) mica-schists+phyllites, and (3) garnet-mica-schists+low grade gneisses+unconsolidated sediments. The best result was related to the Freeman-Durden decomposition, particularly for visual interpretation. However, the statistical Wishart approach, when using as input Freeman-Durden classification, has also presented an inconsistent result. The scattering mechanism related to the gneisses-migmatites was classified as dihedral whereas it should be surface , according to the classified images used as input for the Wishart classification. The statistical validation of the results has indicated, as a general rule, a low performance of polarimetric classifiers, with overall Kappa values below 0.26. In addition, none of the tested classifications was able to discriminate mafic-metamafic units, which are important due to the association with the Cu mineralizations.

Palavras-chave: remote sensing, SAR polarimetry, geology, sensoriamento remoto, polarimetria SAR, geologia.

1. Introdução

A maior parte das atividades relacionadas à geologia (exploração mineral, prospecção de petróleo, hidrogeologia, estudos ambientais ou de engenharia) requer trabalhos de cartografia geológica. Estes, em função da grande extensão das áreas estudadas associada àsdificuldades de acesso, beneficiam-se do uso de técnicas de sensoriamento remoto. Neste contexto, imagens de radar de abertura sintética (SAR) são utilizadas frequentemente em função de sua independência de condições de iluminação, capacidade de penetrar nuvens, vegetação e dependendo, até solos.

Paradella et al. (2005), observaram que nos trabalhos utilizando radar em geologia, predomina o uso qualitativo da informação (brilho), restrito à amplitude do sinal retroespalhado. Desta forma, as imagens têm sido utilizadas principalmente para interpretações visuais similares às utilizadas com fotos aéreas e imagens ópticas. Apesar de efetiva, esta abordagem subutiliza o conteúdo de informação disponível na onda retroespalhada. Além da amplitude, a polarização e a fase do sinal retroespalhado são importantes fontes de informação dos alvos em imagens SAR, que requerem para sua

utilização, uma compreensão melhor dos mecanismos de interação energia/alvo e radares mais avançados (polarimétricos).

Neste trabalho avaliou-se a capacidade de dados polarimétricos ALOS/PALSAR para discriminação litológica em ambiente semi-árido, no Vale do Rio Curaçá BA. Para tanto foram testadas duas das técnicas de decomposição de alvos mais utilizadas, Cloude-Pottier e Freeman-Durden, bem como a classificação híbrida não supervisionada de Wishart que usa como entrada os produtos das decomposições supracitadas.

2. Área de estudo

O Vale do Rio Curaçá localiza-se na porção norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá – OISC - definido por Barbosa (1990) e Barbosa (1996). Este se encontra na borda leste do Cráton São Francisco - CSF - definido por Almeida (1977). O OISC trata-se de um cinturão de rochas gnáissico-granulíticas arqueanas e paleoproterozóicas intensamente deformadas. Esta faixa orogênica tem idade Riaciana e evoluiu em decorrência da colisão de vários blocos arqueanos, no intervalo de 2,1-2,0 Ga (Barbosa e Sabaté, 2002, 2004).

Na área de estudo (figura 1) afloram rochas do Complexo Caraíba (migmatitos e anfibolitos), Complexo Tanque Novo Ipirá (gnaisses, anfibolitos, calcicossilicatadas e quartzitos), rochas metamáficas/metaultramáficas (hospedeiras de minério de cobre), granitóides e sedimentos inconsolidados (Loureiro, 1991).

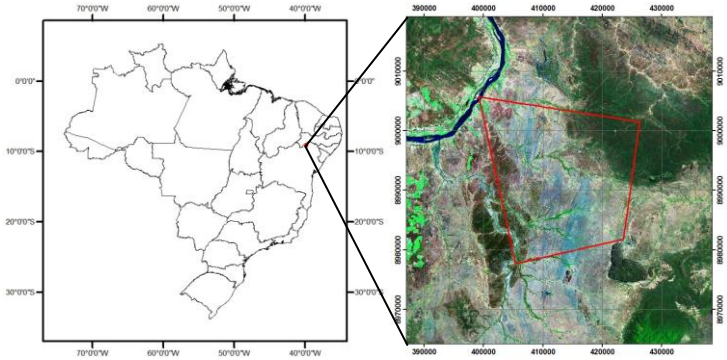


Figura 1: Localização da área de estudo. Imagem Geocover composição R(5)G(4)B(3), coordenadas UTM: datum WGS 84, Z24S.

3. Material e métodos

Na investigação foram utilizados dados polarimétricos (PLR) em banda L do sensor PALSAR adquiridos em 31/03/2009 (período chuvoso). O imageamento foi em órbita ascendente, com azimute de visada de 72º, ângulo de incidência (no centro) de 23,96º e com resolução espacial de 9,36 x 3,57m (range x azimute).

Ao interagir com uma superfície, a onda eletromagnética apresenta um comportamento complexo. É possível inferir os mecanismos físicos de espalhamento da onda eletromagnética pela análise da matriz de espalhamento [S]. No entanto, esta abordagem apresenta inúmeras dificuldades. Uma solução alternativa para a identificação dos mecanismos de espalhamento baseia-se no teorema da decomposição de alvos. O princípio balizador deste teorema é caracterizar a resposta polarimétrica de um alvo real como uma combinação de respostas polarimétricas de espalhadores canônicos, em que a contribuição proporcional de cada espalhador na resposta medida é dada pelo coeficiente de cada espalhador (Woodhouse, 2006). Neste trabalho, foram utilizadas as técnicas propostas por Freeman e Durden (1998) e Cloude e Pottier (1997).

O método de decomposição proposto por Cloude e Pottier (1997) considera a informação contida na matriz de coerência [T] como resultado da soma da contribuição de três tipos de mecanismos de espalhamento onde cada um desses espalhadores é modelado por alvos

canônicos representados por sua própria matriz de espalhamento [T]i de acordo com a expressão:

$$[T] = \lambda_1[T]_1 + \lambda_2[T]_2 + \lambda_3[T]_3 \quad (2)$$

A importância que cada espalhador tem no valor de [T] é dado pelo coeficiente de [T]i que é definido como o autovalor derivado da matriz de coerência (Cloude e Pottier, 1997):

$$\langle[T_3]\rangle = [U_3][\sum][U_3]^{-1} = [u_1 u_2 u_3]\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0 & 0\\ 0 & \lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & \lambda_3\end{bmatrix}[u_1 u_2 u_3]^{T*} \quad (3)$$

sendo: [U3] a matriz unitária contendo os autovetores de T_3 (u1, u2, u3); $[\sum]$ a matriz diagonal contendo os autovalores de T_3 ($\lambda 1 > \lambda 2 > \lambda 3 > 0$) e T* estabelece o complexo conjugado da matriz U3.

Para simplificar a análise das informações físicas fornecidas pela decomposição por autovetor-autovalor, três parâmetros secundários são definidos como função dos autovetores e autovalores de $\langle[T_3]\rangle$: **entropia** (H) – mede o grau de aleatoriedade ou a desordem estatística do processo de espalhamento; **Anisotropia** (A) – é um parâmetro complementar da entropia. Ela fornece informações da importância relativa entre o segundo e terceiro mecanismo de espalhamento por meio da relação de seus respectivos autovalores (λ_2 e λ_3); **Ângulo alfa médio** ($\overline{\alpha}$) – relaciona-se com o tipo de mecanismo de espalhamento médio, sendo definido como:

$\overline{\alpha}$ = 0: indica mecanismos de espalhamento do tipo superficial produzido por superfícies rugosas;

$\overline{\alpha}$ = 45º: indica mecanismo de espalhamento do tipo volumétrico;

$\overline{\alpha}$ = 90º: indica mecanismo de espalhamento do tipo *double-bounce* (dipolo, diedro, refletor de canto).

Os parâmetros H e $\overline{\alpha}$ claramente definem as características de espalhamento de um meio, por isso o plano formado por eles tem sido utilizado como referência para métodos de classificação. O plano H-$\overline{\alpha}$ é dividido em nove zonas, cuja descrição das mesmas é encontrada em Cloude e Pottier (1997). Os limites das zonas são arbitrários e a magnitude absoluta dos autovalores e outros ângulos não são incorporados no esquema de classificação (Lee e Pottier, 2009).

Uma derivação do sistema de referência dado pelo plano H-$\overline{\alpha}$ foi implementado por Cloude e Pottier (1997), ao se agregar a este plano uma nova dimensão dada pelos valores de anisotropia. Cada zona válida do plano H-$\overline{\alpha}$ foi dividida em duas, tomando o valor arbitrário de anisotropia de 0,5 como referência de corte. Assim ficou estabelecido que as zonas Z1, Z3, Z5, Z7, Z9, Z11, Z13, Z15 apresentam menor valor de anisotropia enquanto as zonas Z2, Z4, Z6, Z8, Z10, Z12, Z14, Z16 possuem grau de anisotropia maior.

Este novo espaço 3D de referência possibilitou, de acordo com Cloude e Pottier (1997), resolver ambiguidades na entropia, que podem acontecer para mecanismos de espalhamento com diferentes distribuições de autovalores, mas com similares valores de entropia intermediários. Com isto, foi possível melhorar a capacidade de distinguir diferentes tipos de processos de espalhamento, adotando, por exemplo, o seguinte critério (Lee e Pottier, 2009): alta entropia e baixa anisotropia correspondem a espalhamento aleatório, e alta entropia e alta anisotropia indicam a presença de dois mecanismos de espalhamento com a mesma probabilidade.

A decomposição de Freeman-Durden (1998) baseia-se em três mecanismos de espalhamento simples: volumétrico (ex.: copas de árvores), *double bounc*e (ex.:feições urbanas) e superficial (ex.: água). Esta técnica tem como base a modelagem dos mecanismos de espalhamento descritos em Cloude e Pottier (1996) e assume que a matriz de espalhamento do alvo pode ser representada pela soma coerente da matriz de covariância [C] de cada mecanismo de espalhamento (Li-wen et al., 2007) de acordo com a equação (1):

$$\langle[C]\rangle = f_v[C_v] + f_s[C_s] + f_d[C_d] \quad (1)$$

sendo: $[C_v]$ a matriz de covariância do espalhamento volumétrico; $[C_s]$a matriz de covariância do espalhamento superficial e $[C_d]$a matriz de covariância do espalhamento *double bounce*.

Os produtos gerados pela decomposição de alvos podem ser combinados com técnicas que consideram as propriedades estatísticas dos dados polarimétricos. O primeiro trabalho a utilizar esta abordagem hibrida foi apresentado por Lee et al. (1999) que utilizou a decomposição de Cloude-Pottier (plano H-$\overline{\alpha}$) seguida de um classificador supervisionado MAXVER baseado na distribuição de Wishart. Pottier e Lee (2000) apresentaram uma abordagem semelhante, utilizando, também, a anisotropia (A). No entanto, as interações de Wishart são baseadas apenas nas características estatísticas de cada pixel, ou seja, ignoram as características dos espalhamentos físicos dos pixels durantes as interações. Desta forma, pode haver discrepâncias entre a classificação inicial e a final (ex.: um pixel inicialmente pertencente a uma zona pode migrar para outra, com mecanismo de espalhamento diferente).

Lee et al. (2004) propuseram um algoritmo hibrido utilizando a decomposição de Freeman-Durden seguida por uma classificação K-medias Wishart. Esta abordagem agrupa os pixels em 3 classes de acordo com o mecanismo de espalhamento predominante. A vantagem deste método, em relação àquele que utiliza a decomposição de Cloude e Pottier, é que ele preserva a natureza dos mecanismos de espalhamento dos pixels. Para tanto, as interações de Wishart ficam restritas aos pixels presentes em cada classe, evitando que um pixel, por exemplo, inicialmente classificado como volumétrico, venha a ter ao final do processo outra classificação. Após a classificação final, uma seleção automática de cores é assinalada para cada classe, de acordo com o mecanismo de espalhamento predominante: azul (superficial), verde (volumétrico) e vermelho (*Double-bounce*). O tom de cada cor é assinalado na ordem do aumento do brilho correspondente a potência média da classe dentro de cada categoria.

Para analisar quantitativamente os resultados das classificações, foram utilizadas as matrizes de erros (Congalton e Green, 2008) obtidas do cruzamento entre as imagens classificadas e um mapa litológico de referência (figura 2).

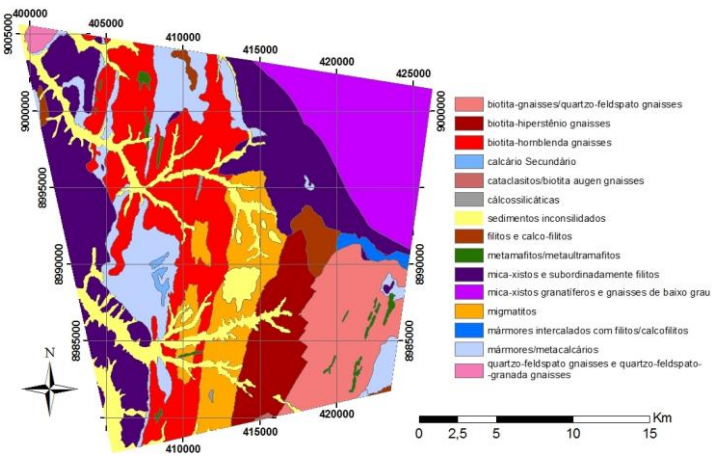


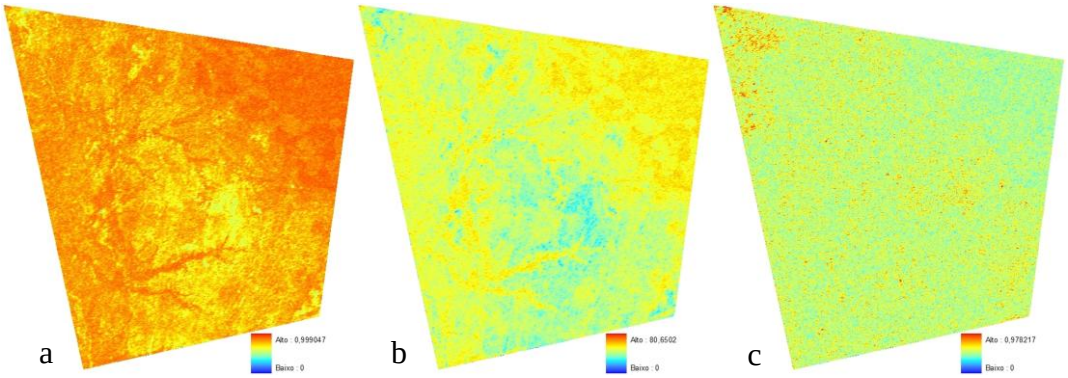
Figura 2: Mapa litológico da área de estudo. Adaptado de Paradella (1983).

4. Resultados e Discussão

Os produtos gerados pela decomposição de Cloude-Pottier podem ser observados nas figuras 3a a 3c. A imagem de entropia mostra que na maior parte da área de estudo, os valores de retroespalhamento são afetados por pelo menos dois mecanismos distintos. As áreas com valores de H mais elevados correspondem às drenagens e xistos (em particular na porção NE da área) nas quais a presença de vegetação é mais significativa.

Xistos, filitos, mármores e sedimentos inconsolidados estão associados a áreas de $\overline{\alpha}$ entre 45º e 80º, ou seja, os mecanismos de espalhamento predominantes são do tipo volumétrico e *double bounce*, provavelmente em função da vegetação. As rochas gnáissicas e migmatíticas estão associadas a valores próximos a zero, indicando o predomínio de espalhamento superficial.

Na maior parte da área de estudo a anisotropia apresenta valores baixos, ou seja, a contribuição do primeiro mecanismo de espalhamento é mais relevante que a dos demais. Nas áreas com valores intermediários, a contribuição dos dois primeiros mecanismos é semelhante.

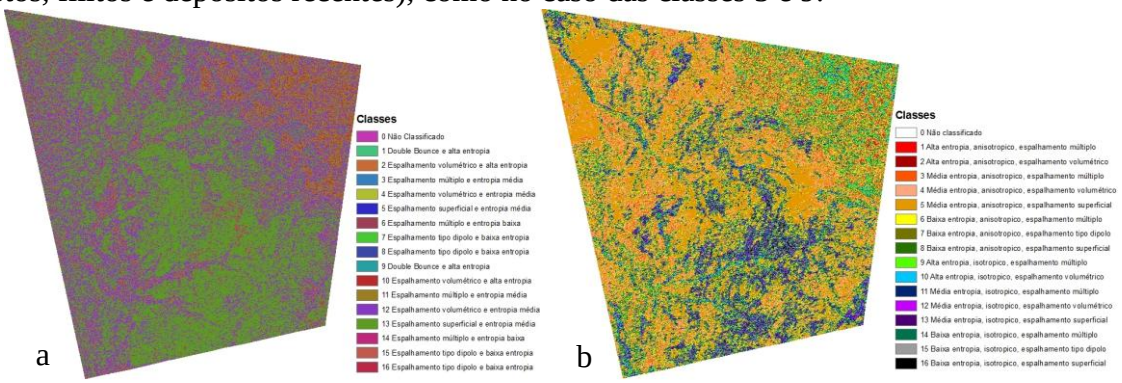


a b c

Figura 3: Imagens resultantes dos parâmetros derivados do modelo de decomposição por autovalores-autovetores: (a) Entropia H, (b) Ângulo alpha médio $\overline{\alpha}$, (c) Anisotropia A.

A figura 4a mostra o resultado da classificação de Cloude-Pottier no espaço A-H-$\overline{\alpha}$. Nota-se que das 16 classes, apenas 5 são relevantes (10-14), as demais apresentam baixa expressividade em termos de área. Pode-se dividir a área em 3 grandes grupos: classes 10 e 11 (xistos e gnaisses), 12 (sedimentos inconsolidados, xistos e filitos) 13 e 14 (gnaisses e migmatitos).

Este último produto ao ser submetido ao classificador de Wishart gera um novo mapa, também com 16 classes (figura 4b). Neste, é possível associar algumas classes com os litotipos presentes na região, no entanto, uma mesma classe pode abranger mais de um litotipo. Isso ocorre particularmente nas unidades com presença mais marcante de vegetação (xistos, filitos e depósitos recentes), como no caso das classes 5 e 9.



a b

Figura 4: Produto gerado pelo método de decomposição baseada no plano A-H-$\overline{\alpha}$: (a) Original; (b) Após a classificação de Wishart.

Os produtos da decomposição de Freeman-Durden podem ser observados nas figuras 6a-6c. O espalhamento *double-bounce* apresenta valores mais elevados nas áreas cobertas por vegetação, destacando os xistos e sedimentos inconsolidados das demais unidades. O espalhamento superficial está associado à rugosidade dos alvos e permite distinguir mármores e sedimentos inconsolidados (valores mais elevados), gnaisses e migmatitos (valores intermediários), xistos e filitos (valores baixos). O espalhamento volumétrico apresenta valores mais elevados nos sedimentos inconsolidados e nos xistos (devido à vegetação) bem como nos mámores e valores baixos nos gnaisses e migmatitos. Este produto permite delinear claramente alguns contatos.

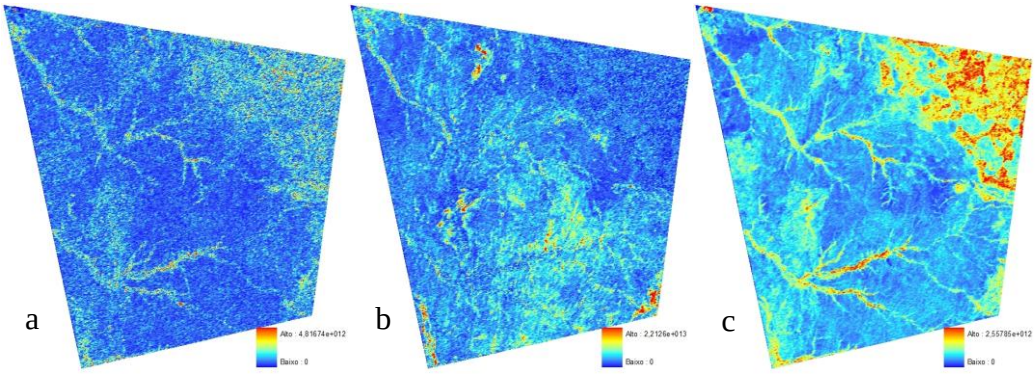


Figura 6: Imagens resultantes dos parâmetros derivados do modelo de decomposição de Freeman-Durden: (a) *Double bounce*, (b) Superficial, (c) Volumétrico.

A associação dos mecanismos de espalhamento aos canais R(double-bounce)-G(volumétrico)-B(superficial) destas imagens (figura 7a) permite, além de, identificar visualmente as unidades supracitadas, observar variações dentro das mesmas, como no caso dos mármores, xistos e gnaisses. Ao submeter estes produtos à classificação de Wishart, um novo mapa foi gerado (figura 7b). Este associou os filitos, xistos, mármores e sedimentos inconsolidados nas diferentes classes onde há predomínio de espalhamento volumétrico. No entanto, apenas uma pequena área de um corpo gnáissico foi enquadrada na classe associada ao espalhamento superficial, enquanto uma área considerável deste litotipo foi englobada pelas classes associadas ao espalhamento *double bounce*. Tal resultado contradiz os dados anteriores (utilizados na sua geração).

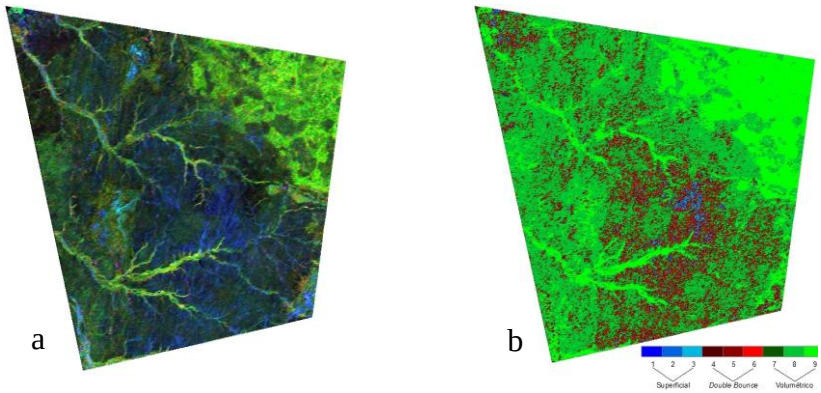


Figura 7: (a) Composiçãotilizando os parametros obtidos pela decomposição de Freeman-Durden: (R) *double bounce*, (G) volumétrico, (B) superficial; (b) Resultado da classificação Wishart Freeman Durden.

Antes de se realizar a avaliação dos mapas gerados, considerando os resultados obtidos, procedeu-se com a agregação de classes (figuras 8a - 8d). A classificação Wishart-Freeman-

Durden, dentre as três testadas, foi a que gerou os melhores resultados, tanto visualmente quanto estatisticamente, com kappa igual a 0,265. As classificações de Cloude e Pottier e Wishard Cloude-Pottier resultaram, respectivamente, em kappa igual a 0,209 e 0,178. Estes resultados, conforme Landis e Koch (1977) são ruins (0,01-0,20) a razoáveis (0,21-0,40).

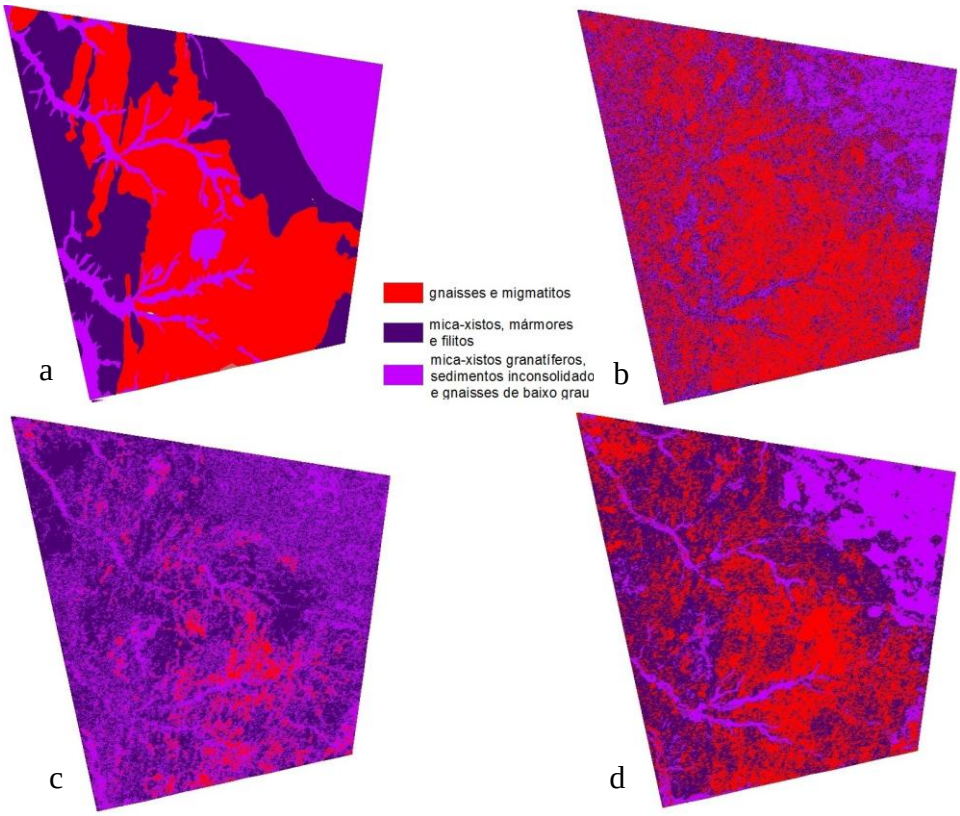


Figura 8: (a) Mapa litológico agregado; (b) Mapa gerado pela classificação de Cloude-Pottier; (c) mapa gerado pela classificação Wishart-Cloude-Pottier e (d) mapa gerado pela classificação Wishart-Freeman-Durden.

5. Conclusão

As classificações, em geral, conseguiram dividir a área em 3 classes: gnaisses+migmatitos; micaxistos+filitos e micaxistos granatiferos+gnaisses de baixo grau+sedimentos inconsolidados . A confusão entre xistos/filitos e sedimentos inconsolidados se deve à presença de vegetação nestas unidades, a qual favorece a ocorrência de espalhamento volumétrico. Deste modo, é possível que em uma imagem obtida em período seco a interferência da vegetação seja menor e os resultados mudem, uma vez que haverá maior participação da rugosidade superficial na resposta destas unidades.

Das três técnicas, o melhor resultado foi apresentador pela classificação Wishart-Freeman-Durden No entanto a análise visual dos produtos da decomposição de Freeman-Durden se mostrou mais eficiente que as classificações digitais. Uma classificação supervisionada possivelmente geraria resultados superiores aos apresentados

Nenhuma das técnicas testadas foi capaz de localizar os corpos de pequeno porte, como as cálcicossilicatadas e metamáficas/metaultramáficas, sendo as últimas de interesse econômico. O resultado da classificação Wishart-Freeman-Durden não foi coerente com a interpretação dos produtos da decomposição.

6. Referências

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasilera de Geociências**., 7(4):349-364, 1977

BARBOSA, J. S. F. The granulite of the Jequi'e Complex and Atlantic Mobile Belt, Southern Bahia, Brazil – an expression of Archean-Proterozoic plate convergence. In: Vielzeuf D., Vidal P, (Eds) **Granulites and crustal evolution**. Boston: Kluwer, Academic, p. 1995-221. 1990.

BARBOSA, J. S. F. O embasamento Arqueano e Proterozoico Inferior do estado da Bahia. In BARBOSA J. S. F., DOMINGUE, J. M. L. (Eds), **Geologia da Bahia,** texto explicativo SME-SGM, Cap'itulo 3, oo63-83. 1996.

BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: a synthesis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 74:343-359, 2002.

BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P. Archean Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, 133(2004):1-27, 2004.
CLOUDE, S.R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. in *Proc.* ***IGARSS***, v. 34, n. 2, p. 498-518, Mar 1996.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 68-78, Jan 1997.

CONGALTON, R. G; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data** - principles and practices. 2 ed. CRC Press, 2008, 210 p.

LANDIS, J. R.; KOCH, C. H. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 3, pp. 159-174, 1977.

LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; GRANDI, G. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, pp. 2363-2373, 1999.

LEE, S. E.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging**: from basics to applications. CRC Press: Taylor & Francis Group, 2009, 398 p.

LI-WEN, Z.; XIAO-GUANG, Z.; YONG-MEI, J.; GANG-YAO,K. Iterative classification of Polarimetric SAR image based on the Freeman decomposition and scattering entropy. **Synthetic Aperture Radar, 2007. APSAR 2007. 1st Asian and Pacific Conference on**. p.473-476, 5-9 Nov. 2007. Disponível em:
< http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4418653&isnumber=4418537> Acessado em novembro de 2012.

LOUREIRO H. S. C. (org). PLGB. Mundo Novo. Folha SC.24-Y-D-IV. Escala 1:100.000. DNPM. Brasília. CPRM/SUREG-SA. 1991

PARADELLA, W.R. **Discriminação de unidades litológicas no Baixo Vale do Rio Curaçá (Bahia), através de realces por processamento digital de dados MSS-Landsat 3.** 233 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1983.

PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E.S.P. Radares imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 56-62, 2005.

POTTIER, E.; LEE, J.S. Unsupervised classification scheme of POLSAR images based on the complex Wishart distribution and the H/A/alpha—Polarimetric decomposition theorem. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, 3., 2000, Munich, Germany. **Proceedings**...Munich: DLR, 2000. CD-ROM.

WOODHOUSE, I. **Introduction to microwave remote sensing**.CRC Press, 2006 369p.