

Aplicação de dados SAR polarimétricos do sensor aerotransportado R99B para mapeamento de crostas lateríticas do platô mineralizado em ferro de N1 (Carajás - Pa)

Arnaldo de Queiroz da Silva¹
Waldir Renato Paradella²
Corina da Costa Freitas²
Cleber Gonzales de Oliveira²
Athos Ribeiro dos Santos²
Rogério Ribeiro Marinho²

¹Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – IEPA
68900-005 – Rod. JK, km 10 – s/nº - Fazendinha – Macapá - Amapá, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

arnaldo; cleber; rogerio{ @dsr.inpe.br }; waldir; athos { @ ltid.inpe.br };
corina@dpi.inpe.br

Abstract

This research has evaluated the potential of polarimetric L-band SAR (Synthetic Aperture Radar) images for iron mineralized lateritic crust discrimination in a moist tropical environment of the Amazon region. The study area comprised the N1 plateau, one of the deposits that are part of the world's largest iron reserves, located on the northern border of the Carajas Mineral Province, Pará. This plateau is dominantly covered by a type-savanna vegetation (Campus rupestres). The three main superficial lithounits in the area are classified as chemical duricrust, iron-ore duricrust and hematite, with the latter having economic interest. The polarimetric quad-pol L-band images were acquired using the airborne SAR-R99B sensor from the SIVAM/CENSIPAM system. The techniques of digital classification of polarimetric images based on the polarimetric target decomposition theory proposed by Cloude & Pottier were evaluated. The validation of classification obtained from the Cloude-Pottier scheme has indicated a poor performance for the polarimetric classifier, with an overall poor Kappa value. The hitting indexes for classes of economic interest have values ranging from 55% to 89%, but at the expenses of high values of commission error.

Palavras-chave: SAR, polarimetric classification, geology, SAR, classificação polarimétrica, , geologia,

1. Introdução

O uso de imagens de radar para aplicação em geologia e mineração é um procedimento consagrado e bem documentado em inúmeros artigos publicados. Grande parte das aplicações, no entanto, utilizam imagens em amplitude ou intensidade, e exploram principalmente as características de brilho e textura das imagens em diferentes configurações de polarização, geometria de iluminação e em multifrequências. Não obstante, aplicações geológicas com dados polarimétricos são poucas, uma vez que esse tipo de dado só passou a ser mais amplamente acessível com o lançamento dos sensores SAR polarimétricos orbitais como o ALOS/PALSAR (2004) e RADARSAT-2 (2007). A isto se soma uma maior dificuldade no processamento dos dados polarimétricos, baseado em novas abordagens teóricas mais refinadas, voltadas em extrair da matriz de espalhamento parâmetros que possam caracterizar os mecanismos de espalhamento atuantes no processo de interação da onda eletromagnética com os alvos terrestres.

Neste trabalho, o objetivo da pesquisa foi utilizar classificação digital de imagens SAR polarimétricas a partir da aplicação de métodos baseados na teoria de decomposição de mecanismos de espalhamento, para mapear crostas lateríticas que capeiam um dos depósitos de ferro da Província Mineral de Carajás - PMC, no estado do Pará.

A área de estudo está localizada em um dos platôs que compõem os depósitos de ferro da PMC, identificado como N1 (Figura 1). O platô N1 constitui parte de uma série de platôs relacionados à sequência meta-vulcânica e meta-sedimentar do Grupo Grão Pará, da qual faz parte a Formação Carajás. Esta Formação é constituída por camadas e corpos lenticulares descontínuos de jaspelitos e lentes de hematita compacta, entremeados por soleiras e diques de rochas básicas, principalmente no domínio setentrional da Serra dos Carajás, onde ocorrem os corpos de minério mais espessos e economicamente importantes (Figueiredo e Silva, 2004). Este platô é capeado por uma espessa e dura crosta laterítica ferruginosa desenvolvida sobre rochas vulcânicas e ferríferas, com uma área de 24 km² e altitude de aproximadamente 700 m, coberto por uma vegetação do tipo savanítica, que na paisagem regional contrasta com uma floresta ombrófila densa de entorno (Morais et al., 2007).

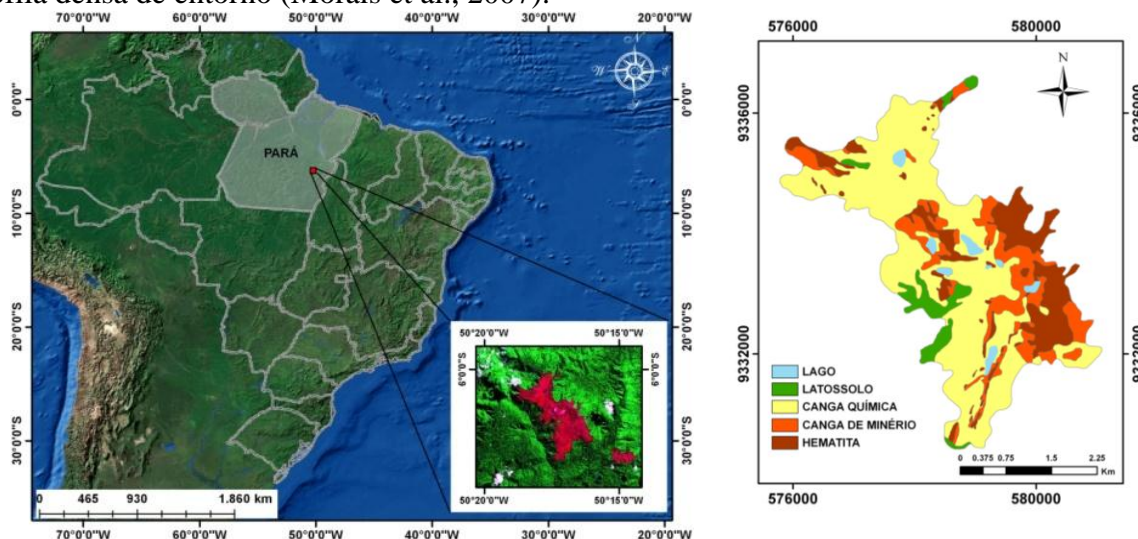


Figura 1 – Localização do platô N1 e mapa geológico de superfície de N1 produzido por Resende e Barbosa (1972)

O platô N1 foi mapeado no final da década de 60, durante a avaliação econômica das reservas de ferro na Província de Carajás por Resende e Barbosa (1972). Neste trabalho, os autores diferenciaram as crostas ferruginosas na área de estudo em: canga laterítica, formada *in situ* por

blocos de limonita; canga de minério, constituída por blocos de hematita e subordinamente especularita, cimentados por óxidos hidratados de ferro; canga química, formada por fragmentos de hematita com psólitos de goethita; e hematita correspondendo aos afloramentos de minério de ferro que em N1 são predominantemente do tipo hematita mole HM, caracteristicamente friável. Adicionalmente, uma unidade de latossolo também foi mapeada em uma área restrita, e associada à vegetação arborea densa.

2. Material e métodos

Foram utilizadas imagens *full* polarimétricas (*single look complex*) adquiridas pelo sensor aerotransportado SAR-R99B/SIVAM obtidas na banda L. Estas imagens fazem parte do acervo adquirido em 15 de junho de 2005 como parte da missão de simulação do satélite MAPSAR (*Multi-Applications Purpose SAR*) do programa de cooperação espacial Brasil-Alemanha (Mura et al., 2009). As imagens foram adquiridas simulando órbita descendente, com ângulos de incidência variando entre 53,37° e 67,23°. A resolução espacial das imagens é 6 m (range) × 0,5 m (azimute).

As imagens passaram pelas etapas de calibração radiométrica (padrão de antena) e polarimétrica (método de Quegan). Além disso, foi realizada a calibração absoluta por meio da técnica de pico de potência, usando a seção cruzada de retroespalhamento de *corners reflectors*, posicionados em campo. De acordo com Mura et al. (2007), os valores obtidos na calibração das imagens R99B foram satisfatórios e atestam a qualidade das imagens com nível de *cross-talk* inferior a -30dB.

Alvos naturais apresentam um espalhamento complexo como consequência da complexidade de sua estrutura geométrica e suas propriedades refletivas, o que torna a interpretação da resposta polarimétrica algo bastante complicado. Por isso, muitas das técnicas desenvolvidas para interpretar os dados polarimétricos usam as informações fornecidas por alvos elementares que apresentam mecanismos de espalhamentos canônicos caracterizados por sua matriz de espalhamento [S]. A matriz [S] é aplicada para modelar a interação da onda eletromagnética com alvos pontuais ou determinísticos. Este tipo de alvo mantém o estado de polarização da onda incidente. Os sistemas reais, no entanto, envolvem espalhadores situados em ambientes dinâmicos, sujeitos à variações no espaço e no tempo (espalhadores não determinísticos). Para lidar com a natureza estocástica desses espalhadores é necessário trabalhar com médias espaciais obtidos de n pixels vizinhos ao pixel considerado, técnica denominada de *multilook*. Esta técnica pode ser aplicada na geração das matrizes de covariância $\langle [C] \rangle$ e coerência $\langle [T] \rangle$.

Para extração de informações de dados polarimétricos foi utilizada uma técnica baseada na teoria de decomposição de mecanismos de espalhamento. O princípio balizador desta teoria 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 foi utilizado o método de decomposição proposto por Cloude e Pottier (1997) em que 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: $[T] = \lambda_1[T]_1 + \lambda_2[T]_2 + \lambda_3[T]_3$. 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):

$$\langle [T_3] \rangle = [U_3][\Sigma][U_3]^{-1} = [u_1 \ u_2 \ u_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [u_1 \ u_2 \ u_3]^T \quad (2)$$

onde $[U_3]$ é a matriz unitária contendo os autovetores de T_3 (u_1, u_2, u_3); $[\Sigma]$ é a matriz diagonal contendo os autovalores de T_3 ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$) e T^* estabelece o complexo conjugado da matriz U_3 .

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 ($\bar{\alpha}$) – relaciona-se com o tipo de mecanismo de espalhamento médio, sendo definido como:

$\bar{\alpha} \rightarrow 0^\circ$: indica mecanismos de espalhamento do tipo superficial (*odd-bounce*) produzido por superfícies rugosas;

$\bar{\alpha} \rightarrow 45^\circ$: indica mecanismo de espalhamento do tipo volumétrico;

$\bar{\alpha} \rightarrow 90^\circ$: indica mecanismo de espalhamento do tipo *double-bounce*.

Os parâmetros H e $\bar{\alpha}$ 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- $\bar{\alpha}$ é dividido em nove zonas, cuja descrição das mesmas são encontrados 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 Potteir, 2009).

Uma derivação do sistema de referência dado pelo plano H- $\bar{\alpha}$ 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- $\bar{\alpha}$ 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 valor mais fraco 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 ambigüidades 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.

Para a validação dos resultados da classificação baseado no método de Cloude-Pottier foi adotado, como referência, o mapa geológico de superfície de Resende e Barbosa (1972), fazendo-se, no entanto, a agregação das classes canga de minério e hematita como a classe de interesse econômico e as demais unidades como canga química. Para isto, usaram-se os parâmetros derivados da matriz de erros (Congalton e Green, 2008).

3. Resultados e Discussões

As imagens referentes aos parâmetros entropia, anisotropia e ângulo alfa médio derivadas do método de decomposição de Cloude-Pottier são mostradas na Figura . A imagem referente à entropia (Figura 2a) mostra que em N1 os alvos apresentam alto grau de aleatoriedade indicando que há pelo menos dois mecanismos de espalhamento com contribuição importante no valor do

retroespalhamento, com exceção das áreas entorno dos lagos onde provavelmente a superfície das rochas seja mais lisa. Os valores de $\bar{\alpha}$ distribuem-se em torno do ângulo de 450° ($370^\circ < \bar{\alpha} < 540^\circ$). Todavia, o padrão assimétrico do histograma da Figura 2b, com a moda posicionada no sentido dos maiores ângulos, indica que grande parte dos alvos exibe mecanismo de espalhamento resultante da combinação do espalhamento volumétrico com uma pequena contribuição do tipo *double-bounce*.

A anisotropia (Figura 2c) exibe valores predominantemente baixos, com a moda em torno de 0,20. Isto indica que o segundo e terceiro mecanismo de espalhamento tem contribuição equivalente no retroespalhamento total e são bem menos importantes que o primeiro mecanismo. Segundo Lee e Pottier (2009) esta situação pode corresponder a um mecanismo de espalhamento simples dominante ou a um tipo de espalhamento aleatório. As áreas onde a anisotropia tem valor médio indicam que há equivalência na contribuição do primeiro e segundo mecanismos.

O resultado da classificação usando o plano de referência $H-\bar{\alpha}$ é mostrado na Figura . Observa-se que a maior parte da área de N1 se situa na zona 2 (cor azul), caracterizada por alta entropia e espalhamento do tipo volumétrico com alguma contribuição do tipo *double-bounce*. O espalhamento volumétrico também caracteriza a zona 5, identificada na imagem com a cor magenta, que aparece ocupando o domínio das superfícies mais lisas. A diferença desta classe para a anterior está nos valores de entropia menores o que indica menor aleatoriedade dos espalhadores contidos na célula de resolução da imagem. Além dessas duas classes que praticamente dominam toda superfície de N1, aparecem localmente as classes 4 e 8, com a primeira caracterizada por espalhamento do tipo *double-bounce* com média entropia, e a segunda por espalhamento volumétrico mas de baixa entropia.

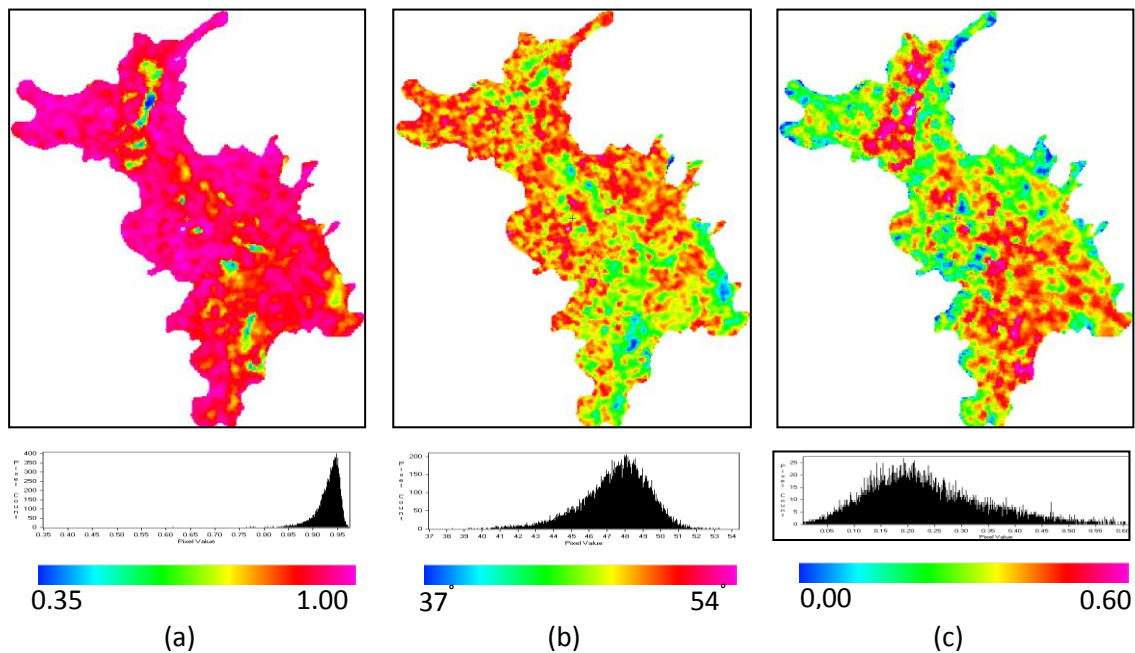


Figura 2– Imagens resultantes dos parâmetros derivados do modelo de decomposição por autovalores-autovetores para imagem R99B: (a) entropia H, (b) ângulo alfa médio $\bar{\alpha}$, (c) anisotropia A.

Para se avaliar a distribuição espacial das classes do plano $H-\bar{\alpha}$ com o mapa geológico de superfície agregado (Figura 4b), fez-se também a agregação das classes da imagem classificada,

mantendo-se a classe 2 como uma única classe e as demais foram agregadas para formar uma nova classe (Figura 4a).

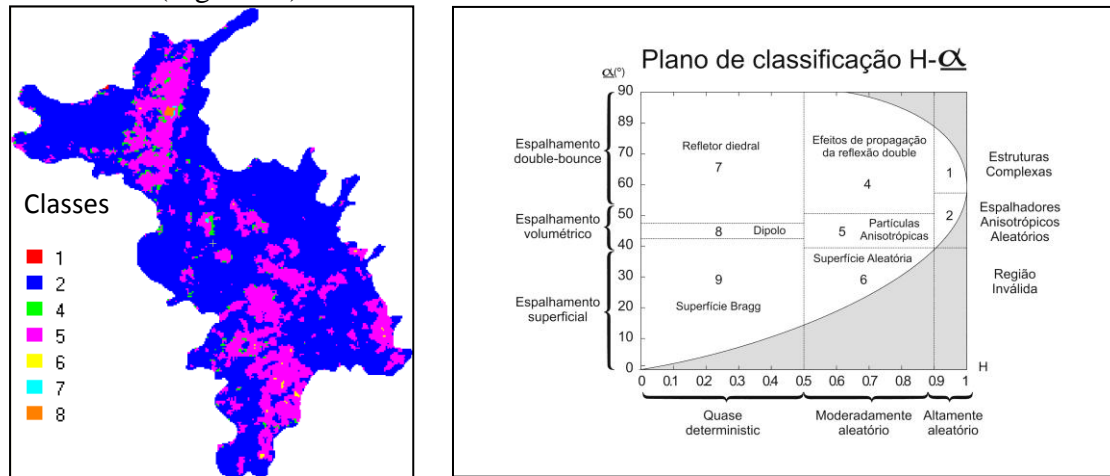


Figura 3 - (a) Imagem R99B classificada pelo método de decomposição baseada no plano H- α ; (b) Plano de classificação H- α com descrição do significado físico das zonas de referência.

Na comparação visual da imagem classificada agregada com o mapa de referência, relacionando-se a classe 2 com a unidade canga química e as demais classes à classe agregada de interesse econômico (canga de minério + hematita), fica evidente que o índice de intersecção entre as classes correspondentes é muito baixo. Para quantificar os erros associados a esta classificação foi obtida a matriz de erro obtida do cruzamento da imagem classificada com o mapa de referência (considerou-se todo o universo de pixels da imagem) da qual se calculou um kappa global de apenas 0,11. O índice de acerto da canga química foi de 30,9% e da classe de interesse econômico foi de 83% com erros de omissão e comissão para esta última unidade de 16% e 62%, respectivamente.

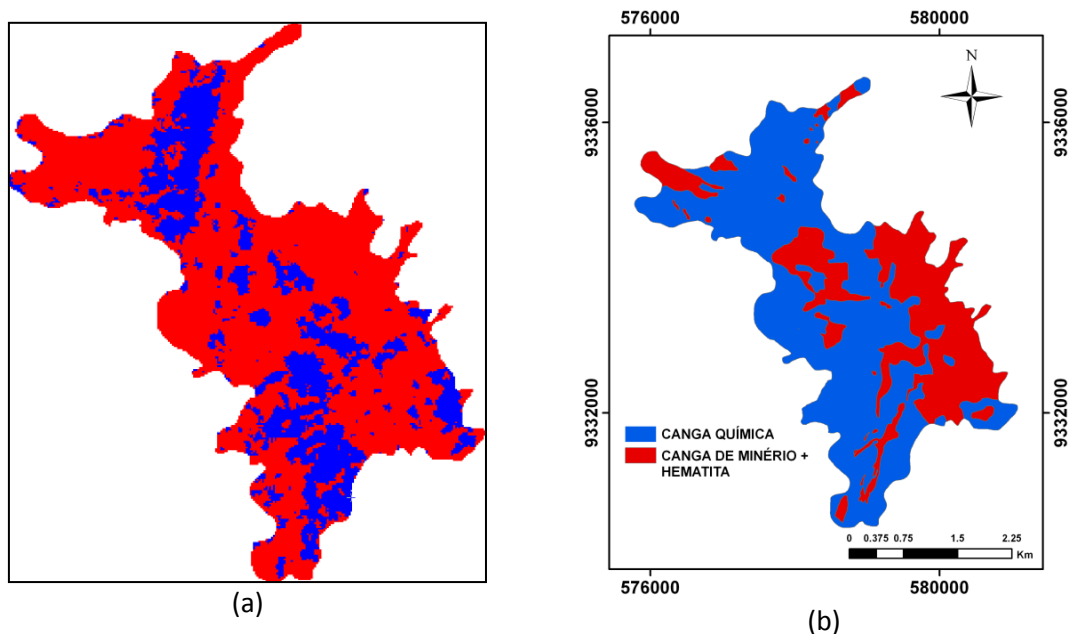


Figura 4 – (a) Imagem classificada pelo método de decomposição baseada no plano H- α agregada, (b) mapa geológico agregado.

Além da técnica de classificação baseada no plano $H-\bar{\alpha}$, também se avaliou o método em que a anisotropia é incorporada como uma terceira dimensão resultando em um espaço 3D de referência. Neste espaço, o número de zonas associadas a tipos específicos de mecanismos de espalhamento passa a ser de 16. O resultado desta classificação é mostrado na Figura 5.

A incorporação da anisotropia contribuiu muito pouco para o resultado da classificação final. Novamente, apenas duas classes se destacam apesar desse método dobrar o número de zonas de referência. Lembra-se que as zonas identificadas com números pares apresentam grau de anisotropia mais elevado e isto é um resultado curioso visto que a zona 4 equivale à zona 2 do plano $H-\bar{\alpha}$ mas com anisotropia mais elevada. No entanto, ao se analisar a imagem referente à anisotropia (Figura 2c), observou-se que em N1 predominam valores de anisotropia abaixo de 0,5. Para a classe 10, essa observação também é válida.

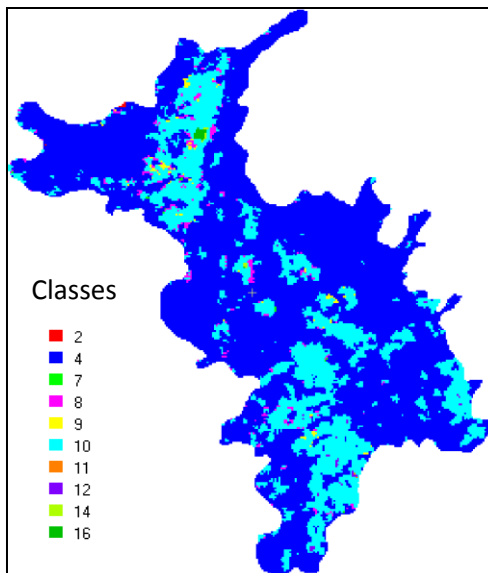


Figura 5 **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**
- Imagem R99B classificada pelo método de decomposição baseada no espaço 3D $H-\bar{\alpha}-A$.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que o método de classificação baseado no plano entropia-alfa proposto por Cloude-Pottier, empregado para mapeamento de crosta laterítica, resultou em baixo valor de *kappa* (0,11). No entanto, quando se avaliou o índice de acerto da classe de interesse econômico (canga de minério + hematita), este foi de 83%, porém a custo de erros altos de comissão (63%). A incorporação da anisotropia ao espaço de referência para rotulação dos pixels não trouxe contribuição significativa para o resultado da classificação.

Referências

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.

FIGUEREDO e SILVA, R., C. Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspilitos e minérios de ferro dos depósitos N1 e N4W, N4E e N5E, Província Mineral de Carajas, Pará: implicações para a mineralização de ferro.

2004. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2004.

FREEMAN, A.; DURDEN, S. L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 3, May 1998.

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

MORAIS, M.C.; PEREIRA JUNIOR, P.M., PARADELLA. Potencial of SAR data (L-hh-hv-vv) to discriminate iron-mineralised laterites in the region Amazon (Carajás Province) based on textural attributes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE, 2007, p. 2069-2078.

MURA, J. C.; CORREIA, A. H. Calibração preliminar dos dados SAR polarimétricos em banda L do sensor R99B do CENSIPAM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE, 2007, p. 4951-4958.

MURA, J. C.; PARADELA, W. R.; DUTRA, L. V.; SANTOS, J. R.; RUDORFF, B. F. T.; MIRANDA, F. P.; SILVA, M. M. Q.; SILVA, W. F. MAPSAR images simulation based on L-band polarimetric data from SAR-R99B airborne sensor (SIVAM system). *Sensors*, v. 9, p. 102-117, Jan 2009.

RESENDE, N. P.; BARBOSA, A. L. M. Relatório de pesquisas de minério de ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. Belém: AMZA, v. 1. 1972. 248 p.

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