

Discriminação de tipos de cobertura vegetal em áreas alagáveis utilizando imagens de radar bandas L e C polarimétricas

Lauriana Rúbio Sartori¹
Nilton Nobuhiro Imai¹
José Cláudio Mura²
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo²

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP/FCT
Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305 – 19060-190 – Presidente Prudente - SP, Brasil
lauriunesp@gmail.com; nnimai@fct.unesp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/DPI
Av. dos Astronautas, 1758 – 12227-010 – São José dos Campos - SP, Brasil
mura@dpi.inpe.br; evlyn@ltd.inpe.br

Abstract. The aim of this paper is to evaluate the contribution of SAR (Synthetic Aperture Radar) images, P and L bands, full polarimetric, to discriminate vegetal cover. The study area is the floodplain region of the Lago Grande of Monte Alegre – Amazon. The acquisition of the P band data was a joint effort among the German company AeroSensing Radarsysteme, Brazilian Army and Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). The mission was carried out in September, 2000. Simultaneously, it was realized a fieldwork in order to acquire the ground truth data. The L band was acquired, on June 23rd, 2005, by airborne sensor R99B of SIVAM (*Sistema de Vigilância da Amazônia*). The sample elements were drawn in both georeferenced images. In following, it was analyzed the radiometric response and the entropy/alpha plane, obtained by target decomposition. The targets radiometric response was analyzed taking into account the average and standard deviation of amplitude image (HH, HV, VV of both bands) for each sample element. The entropy/alpha plane was obtained and compared between two bands. The results indicated that radiometric response of L band has potential to discriminate the three different types of targets, while the P band presents confusion between water and aquatic vegetation. The entropy/alpha plane presented confusion between aquatic vegetation and flooded forest for P and L bands, but these elements were separated from the water for L band.

Palavras-chave: fully polarimetric radar data, radiometric response, entropy/alpha plane, dado de radar completamente polarizado, resposta radiométrica, plano entropia alpha.

1. Introdução

O uso de imagens de radar para ampliar o conhecimento fisionômico-estrutural da vegetação tem aumentado nos últimos anos devido a pelo menos dois fatores: 1) interesse em aumentar o conhecimento sobre as interações entre a radiação de microondas e a vegetação em determinadas faixas de comprimento de onda e polarização; 2) melhorias tecnológicas oferecidas, como polarimetria, interferometria e uma melhor qualidade radiométrica das imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) (GAMA et. al, 2006).

Devido à maior penetração da radiação da banda P, de maior comprimento de onda, no dossel da vegetação em relação às demais (X, C, S, L) tem-se ampliado o interesse em seu estudo. Conforme Santos et al. (2002), para determinados estudos, como por exemplo, a estimativa de parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, os dados de radar das bandas L, X e C apresentam limitações inerentes às frequências utilizadas, principalmente pela baixa penetração através do dossel.

Pequenos comprimentos de onda, como os das bandas X e C, por exemplo, trazem informações apenas sobre as camadas superficiais do dossel vegetal, devido ao retroespalhamento produzido pelas folhas e pequenos galhos. Já comprimentos de onda maiores, como os da banda L e P, têm uma penetração maior no dossel vegetal e o

retroespalhamento é causado pelos galhos e tronco (DOBSON, 2000). Assim, as bandas L e P têm, teoricamente, maior potencial para discriminar tipos de cobertura vegetal que apresentem diferenças estruturais (formato de copa e galhos, densidade de folhas, etc.), ou seja, espera-se obter informações que diferenciem e, se possível, caracterizem diferentes estruturas geométricas.

Segundo Novo e Costa (2005), numa área de vegetação inundada, a radiação de microondas da banda L atinge a superfície da água, é refletida especularmente por ela, atinge os troncos das árvores e retorna à antena, no chamado espalhamento *double-bounce*. Os comprimentos de onda mais curtos da banda C ao contrário, são espalhados pelo dossel – o que provoca o chamado espalhamento de superfície, que não permite a detecção da água abaixo do dossel da vegetação.

A interação dos objetos na superfície terrestre com as microondas tem relação direta com a polarização incidente. Se os objetos na superfície terrestre possuem uma orientação vertical predominante, como, por exemplo, plantação de eucalipto, a interação com sinais de microondas verticalmente polarizados será maior, gerando um maior retroespalhamento nesta orientação. Os objetos ou superfícies espalhadoras podem, em função da polarização incidente e de sua estrutura, despolarizar a onda eletromagnética incidente, devido aos mecanismos de espalhamento presentes na área imageada.

Via de regra, o retro-espalhamento em polarizações paralelas (HH ou VV) é mais forte que em polarizações cruzadas (HV ou VH) (LEWIS et al., 1998), pois nas cruzadas deve ocorrer um processo de despolarização, devido a múltiplas interações, para que haja um sinal de retorno, e que normalmente reduz a potência do sinal recebido pela antena.

A forma geométrica dos objetos pode alterar a quantidade de energia retroespalhada na faixa de microondas. Entre as variáveis que descrevem a forma da cobertura vegetal se destacam a altura, orientação e forma de galhos e folhas, porcentagem de recobrimento do substrato etc (NOVO e COSTA, 2005).

Neste trabalho foi escolhida a planície da região do Lago Grande de Monte Alegre na Amazônia. As planícies são áreas alagáveis de grande importância ecológica, além de terem um papel crucial no balanço global carbono (MELACK et al. 2004). Além disso, são ambientes caracterizados por numerosa variedade de plantas e animais e são importantes para a manutenção dos recursos hídricos.

A partir de 2006 tornaram-se disponíveis dados polarimétricos orbitais nas bandas L e C, e existem perspectivas de missões orbitais na banda P. Nessa perspectiva o objetivo desse estudo é avaliar a contribuição de imagens SAR nas bandas P e L, polarimétricas, como fonte de informação para discriminação de tipos de cobertura vegetal em ambientes alagáveis. Para isso, serão enfocados os seguintes aspectos:

- i) Analisar a resposta radiométrica dos diferentes tipos de cobertura de áreas alagáveis por meio da determinação da média e desvio-padrão das imagens amplitude (HH, VV e HV de ambas as bandas) para cada um dos elementos amostrais;
- ii) Analisar a resposta do plano entropia/alpha a ser gerado para as duas bandas.

2. Decomposição de alvos: decomposição do autovetor da matriz de coerência

As informações sobre um dado alvo imageado e a descrição do processo de espalhamento estão contidas na matriz de espalhamento $[S]$. Esta matriz pode ser substituída por um vetor complexo (\vec{k}), o qual contém a informação completa da matriz $[S]$, conforme a Equação 1:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \rightarrow \vec{k} = \frac{1}{2} \text{Traço}([S]\Psi) = [k_0, k_1, k_2, k_3]^T \quad (1)$$

em que S_{hv} expressa o elemento de espalhamento do alvo para o sinal que foi transmitido por uma antena de polarização horizontal e recebido por uma antena de polarização vertical (v), e os outros três elementos são similarmente definidos; $Traço[B]$ é a soma dos elementos da diagonal de qualquer matriz $[B]$, e $\Psi = ([\psi_0], [\psi_1], [\psi_2], [\psi_3])$ é um conjunto de matrizes complexas 2x2, que forma uma base ortogonal.

Entre os conjuntos de base, duas são muito utilizadas na literatura: a base de Borgeaud (\vec{k}_B) e a base de Pauli (\vec{k}_P). O produto vetorial entre o vetor de espalhamento convencional (vetor de Borgeaud) \vec{k}_B , e seu complexo conjugado transposto \vec{k}_B^{*T} resulta na matriz de covariância polarimétrica $[C]_{4 \times 4}$ (BOERNER et al., 1981), como pode ser verificado pela Equação 2. A matriz de coerência $[T]_{4 \times 4}$ utiliza o vetor de Pauli como demonstra a Equação 3. As duas possuem as mesmas informações e podem ser mutuamente transferidas de uma para a outra sem perda de informação:

$$[C]_{4 \times 4} = \langle \vec{k}_B \vec{k}_B^{*T} \rangle \quad (2)$$

$$[T]_{4 \times 4} = \langle \vec{k}_P \vec{k}_P^{*T} \rangle \quad (3)$$

em que $\langle \dots \rangle$ indica a média espacial do conjunto, com a suposição de que o meio espalhador seja homogêneo.

A matriz de coerência pode ser decomposta em uma soma de três matrizes de coerência $[T_n]$, cada uma ponderada por seus correspondentes autovalores, como mostra a Equação 4:

$$[T] = \sum_{n=1}^3 \lambda_n [T_n] = \lambda_1 (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1^T) + \lambda_2 (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2^T) + \lambda_3 (\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_3^T) \quad (4)$$

Esta decomposição é denominada decomposição do autovetor da matriz de coerência ou Teorema da Decomposição de Cloude. A idéia principal do teorema de decomposição dos alvos (TD – Target decomposition) é expressar o mecanismo médio de espalhamento como uma soma de elementos independentes e associar um mecanismo físico a cada um destes elementos (CLOUDE e POTTIER, 1996).

A partir dessa decomposição, pode-se considerar um espaço de classificação bidimensional como mostra a Figura 1. Todo mecanismo de espalhamento aleatório pode ser representado neste espaço, chamado espaço entropia (H) alpha (α), em oito diferentes zonas.

As zonas especificadas (CLOUDE e POTTIER, 1997) representam os seguintes mecanismos de espalhamento: (Z1) Alta entropia e múltiplo espalhamento (Ex.: camadas de vegetação com estrutura geométrica bem desenvolvida); (Z2) Alta entropia e efeito dipolo (Ex.: Espalhamento volumétrica da vegetação); (Z3) Não faz parte de uma região válida; (Z4) Espalhamento múltiplo com média entropia (Ex.: *Double bounce* em áreas urbanas); (Z5) Espalhamento com média entropia (Ex.: superfícies vegetadas com espalhadores anisotrópicos); (Z6) Espalhamento de superfície com média entropia – (Ex.: Propagação no dossel ou elevação da rugosidade da superfície; (Z7)); Espalhamento múltiplo com baixa entropia (Ex.: espalhadores diédricos metálicos isolados); (Z8) Espalhamento de dipolo com baixa entropia (Ex.: vegetação com elementos de espalhamento anisotrópicos altamente correlacionados;) (Z9) Espalhamento de superfície com baixa entropia (Ex.: água e oceano em baixas frequências e superfícies bem suaves.)

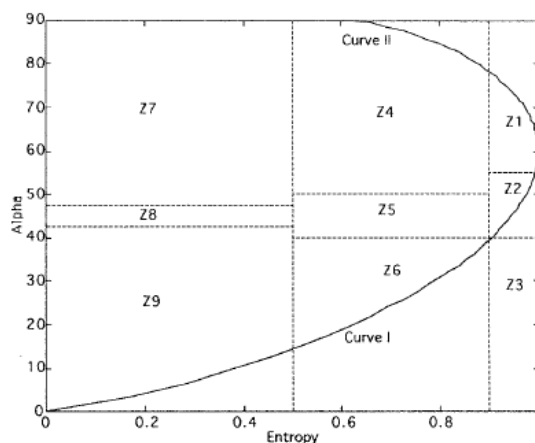


Figura 1. Plano com a entropia (H) e alpha (α).

Fonte: Cloude e Pottier (1997).

3. Materiais e métodos

Neste estudo foram utilizados dados de radar polarimétricos da banda P e L, adquiridos sobre a região de Lago Grande de Monte Alegre na Amazônia.

O experimento para aquisição dos dados referentes à banda P foi um esforço conjunto entre a empresa alemã AeroSensing Radarsysteme, o Exército Brasileiro e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A missão foi realizada em setembro de 2000 e a imagem complexa da banda P possui 1,5x0,7 m de espaçamento do pixel e espaçamento da linha, respectivamente.

Concomitante à aquisição das imagens, foi realizado um trabalho de campo para coleta de dados da planta aquática e floresta alagada. Foram coletadas algumas medidas em campo, entre elas a altura média do banco de macrófitas e densidade média do banco (indivíduos/m²).

A banda L polarimétrica foi adquirida pelo sensor aerotransportado R99B do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia) no dia 23 de junho de 2005, sendo que a imagem complexa da banda L possui 5x2,5 m de espaçamento do pixel e espaçamento da linha, respectivamente. É possível utilizar os dados de campo para avaliar a resposta desta banda já que o voo com o sensor R99B é de um mês próximo dos dados de campo (setembro). Isto porque, considerando-se que o banco de macrófitas é de, aproximadamente, 100 por 100 m, se houver alteração na localização deste banco, esta alteração não deve afetar as análises. A diferença é que em junho as plantas ainda estão em período florescente e em setembro estão em senescência.

Os dados de campo disponíveis para a área trabalhada foram cinco elementos amostrais de planta aquática e um elemento de floresta alagada. Devido a essa quantidade insuficiente de elementos, foi realizada uma interpretação visual das imagens com base nas informações de campo e coletados três outros elementos de floresta alagada e três elementos de água.

Para a realização das medidas nas imagens foi utilizada uma área quadrada de 50 m² tendo como pixel central as coordenadas do elemento amostral.

Em relação às informações adquiridas em campo, os elementos de planta aquática são caracterizados pelas seguintes alturas acima do nível da água: 85 cm (elementos 4 e 8), 35 cm (elementos 5 e 7) e 20 cm (elemento 6). A densidade média de cada um destes elementos é de aproximadamente: 12 indivíduos/m² para os elementos 4 e 7, 16 indivíduos/m² para os elementos 6 e 8, 22 indivíduos/m² para o elemento 5.

A seguir serão descritos os procedimentos a que foram submetidas as imagens amplitude para posterior cálculo da média e desvio-padrão dos elementos amostrais e os procedimentos realizados nas imagens complexas, a partir das quais foi gerado o plano entropia/alpha para os elementos amostrais.

3.1 Procedimentos realizados na imagem amplitude

O *speckle*, presente nas imagens de radar, é um ruído dependente do sinal, devido à natureza coerente da radiação emitida pelo radar. Ele tem caráter multiplicativo, ou seja, aumenta com a intensidade do sinal. Em certas aplicações, este ruído inibe a habilidade do intérprete humano de extrair informações úteis, tanto quanto de se fazer uma classificação e/ou segmentação automática (SANT'ANNA, 1995). Existem duas maneiras de reduzir o *speckle* nas imagens: processamento *multilook* e filtragem.

Tanto a imagem amplitude quanto a complexa utilizadas neste trabalho foram processadas de maneira a se reduzir o *speckle*. O tamanho do pixel no alcance inclinado da imagem amplitude da banda P é de 1.5 m. A amplitude da banda L foi extraída da matriz de covariância, a qual foi gerada com média espacial de 2 pixels em range e 4 pixels em azimute a partir dos dados complexos. Como o tamanho do pixel deste dado complexo no alcance inclinado é de 5 m e em azimute é de 2,5 m, este pixel retangular foi transformado para quadrado de tamanho 10 x 10 m. Esta transformação reduz o ruído *speckle*.

Os radares obtêm dados com amostras igualmente espaçadas no alcance inclinado. Entretanto, para comparar com mapas e informação geográfica, necessitam-se amostras igualmente espaçadas no terreno. A transformação do alcance inclinado para o alcance no terreno requer a reamostragem da imagem. Para isso, seria ideal dispor de um Modelo de Elevação Digital (DEM) para a área em estudo, o qual pode ser usado para ortorretificar a imagem SAR e conseqüentemente corrigir a imagem de distorções relacionadas ao relevo. Entretanto, como a área de estudos é relativamente plana, desconsiderou-se a aplicação de ortorretificação e realizou-se apenas a correção de alcance inclinado (*slant*) para alcance no terreno (*ground*) utilizando-se o *software* ENVI 4.2. Em *slant*, as distâncias são medidas entre a antena e o alvo no terreno, enquanto que em *ground*, distâncias são determinadas entre a projeção da plataforma no terreno e o alvo. Com auxílio do *software* ENVI, a transformação *slant to ground* corrige cada ponto levando em consideração a altura da aeronave, a distância do alcance mais próximo da imagem, o tamanho do pixel em *slant*, o tamanho do pixel em *ground*, a definição da posição à esquerda ou à direita do alcance mais próximo e o método de reamostragem.

Em seguida, as amplitudes foram georreferenciadas e foram determinados os valores de média e desvio-padrão para elementos amostrais de floresta alagada, água e planta aquática.

3.2 Procedimentos realizados na imagem complexa

As imagens foram processadas no *software* RAT (*Radar Tools*) versão 19, o qual é um *software* livre desenvolvido pela Universidade de Berlin, na linguagem IDL. Ele tem uma coleção de ferramentas para processamento de imagens de radar, como, por exemplo, filtros *speckle*, decomposição polarimétrica, rotinas interferométricas, entre outras (REIGBER e HELLWICH, 2007). A partir das imagens complexas calibradas e com o padrão da antena corrigido, foi gerado o vetor de espalhamento e em seguida a matriz de covariância e coerência. Este processamento resulta em dados *multilook*, gerados pós-processamento SAR. O processamento *multilook* reduz o ruído *speckle* e por isso, não foi aplicado nenhum filtro redutor de *speckle*.

A partir da matriz de coerência foi feita a decomposição de autovetores desta matriz e gerado os parâmetros entropia (H), alpha (α) e anisotropia (A), como mostra a Figura 2.

As imagens entropia (H) e alpha (α) foram corrigidas do alcance inclinado para o alcance no terreno e georreferenciadas a partir da transformação obtida com o georreferenciamento da imagem amplitude.

Foram gerados os espaços entropia/alpha para as bandas L e P considerando-se os 12 elementos amostrais.

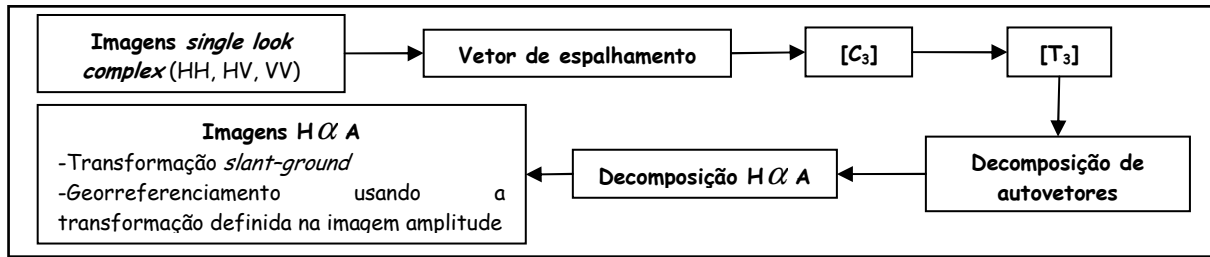


Figura 2. Processamentos realizados nas imagens complexas.

4. Resultados

Os valores de média e desvio-padrão determinados sobre a imagem amplitude, para elementos amostrais de floresta alagada, água e planta aquática são apresentados na Figura 3.

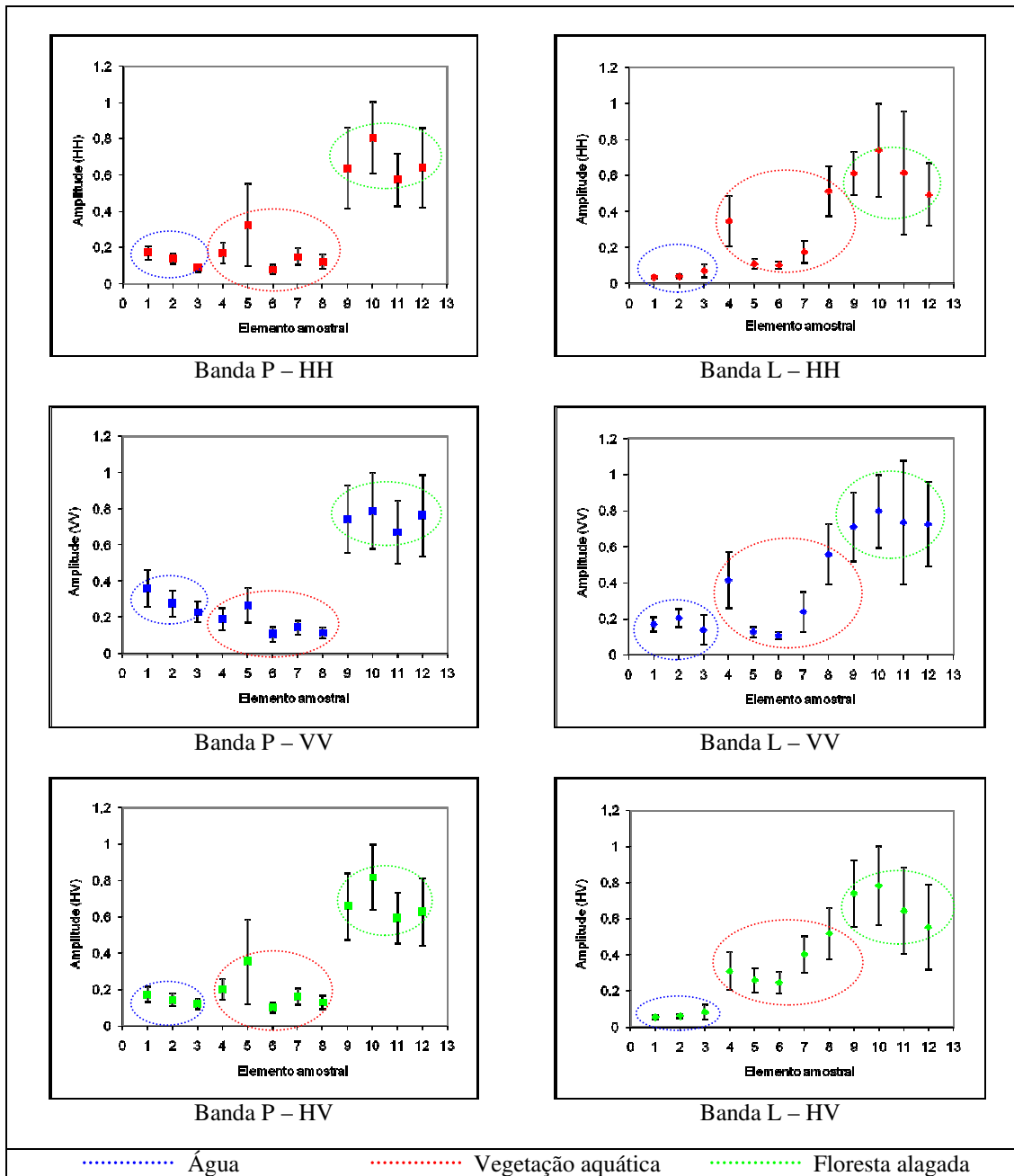


Figura 3. Amplitude média e desvio-padrão para polarizações HH, HV e VV (bandas P e L).

Os elementos de 1 a 3 referem-se ao alvo água, os de 4 a 8 são elementos de planta aquática e os de 9 a 12 correspondem a elementos de floresta alagada.

Observa-se que para a floresta alagada (9 a 12) a resposta em todas as polarizações e para ambas as bandas é maior que para as duas outras classes. Isto significa que o retroespalhamento para a floresta alagada é maior do que para as outras duas classes, como era de se esperar.

Observe que para a banda P, polarização HH e HV, a amplitude média para a água (1 a 3) e planta aquática se confundem, com exceção do elemento amostral 5. Este elemento, o qual se destaca com maior retroespalhamento entre os de planta aquática e maior desvio-padrão é o que possui maior densidade média (22 indivíduos/m²). Na polarização VV, observa-se menor confusão entre as classes água e planta aquática, a qual possui menor retroespalhamento em relação à água.

Em relação à banda L, nota-se uma maior diferenciação entre as três classes, principalmente para a polarização HV. Dois elementos se destacam nas polarizações HH e VV: elementos 4 e 8. A amplitude média destes elementos nestas polarizações é maior que a dos outros. Estes elementos apresentam maior altura acima do nível da água (85 cm). Observe que a resposta de ambos, nas duas polarizações citadas, é próxima da resposta da floresta alagada.

A Figura 4 apresenta os espaços entropia/alpha para as bandas P e L.

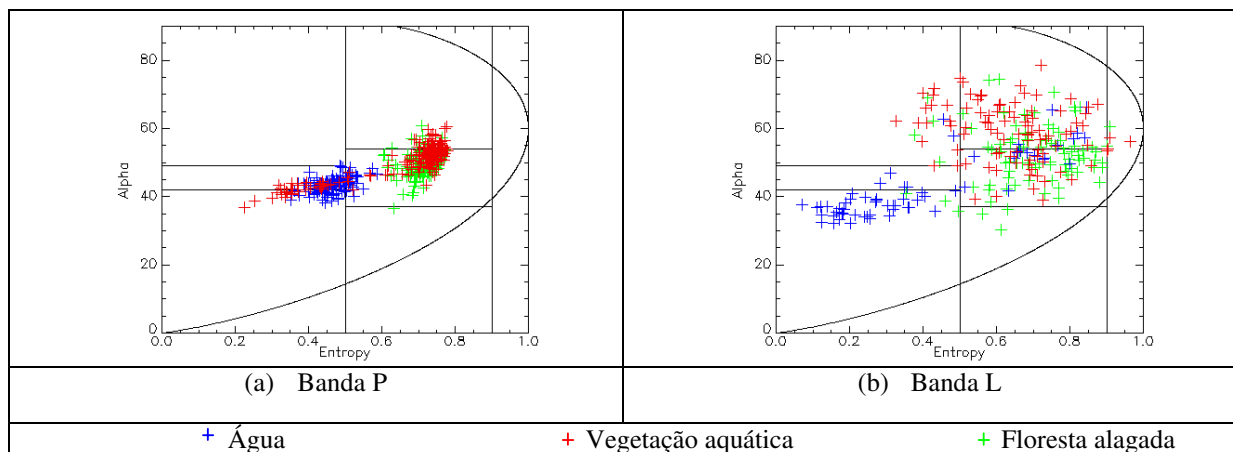


Figura 4. Espaços entropia/alpha para as bandas P (a) e L (b).

Os elementos amostrais de água se concentram na zona 9, como era de se esperar, principalmente para a banda L. Os elementos de floresta alagada e planta aquática se concentram na zona 5 para a banda P e nas zonas 5 e 4, respectivamente, para a banda L. Note que a entropia da banda L separa os elementos de água e aqueles dos dois grupos de vegetação, os quais apresentam grande confusão e dispersão. Para a banda P alguns elementos de plantas aquática se confundem com elementos de água. Isso é explicável pelo fato da maior penetração da radiação de ondas mais longas abaixo do dossel da vegetação, alcançando a superfície de água e sendo refletida por ela. Esta discussão corrobora as análises feitas para a amplitude.

5. Conclusão

Este trabalho permitiu avaliar a contribuição de imagens SAR nas bandas P e L, polarimétricas, como fonte de informação para discriminação de tipos de cobertura vegetal como planta aquática e floresta alagada e o alvo água presentes na área alagável da região do Lago Grande de Monte Alegre na Amazônia. Para isso, foi analisada a resposta radiométrica dos alvos por meio da determinação da média e desvio-padrão das imagens amplitude (HH,

VV e HV de ambas as bandas) para cada um dos elementos amostrais e foi analisada a resposta do plano entropia/alpha gerado para as duas bandas.

Em relação à resposta radiométrica, a banda L discriminou os três diferentes tipos de alvos, enquanto que para a banda P, a resposta das plantas aquáticas foi semelhante à resposta da água. Isto significa que a banda P não interage tanto com as plantas aquáticas como a banda L.

O plano entropia/alpha permitiu verificar que os elementos amostrais de água, em sua maioria, se separam dos elementos de planta aquática e floresta alagada para ambas as bandas. Entretanto, não ocorre separação entre estas duas últimas classes.

Comparando a resposta obtida pela amplitude e a resposta obtida pelo plano entropia/alpha, a primeira apresentou maior potencial em discriminar os três diferentes alvos.

Estudos mais aprofundados devem ser realizados no sentido de discriminar as diferentes espécies de planta aquática com relação às principais variáveis que descrevem a forma dos objetos, como altura e porcentagem de recobrimento do substrato. Como apresentado nos resultados, o elemento de maior densidade média se destacou na resposta radiométrica da banda P, enquanto que os elementos de maior altura acima do nível da água se destacaram na banda L.

Referências

- ALBERGA, V. Comparison of polarimetric methods in image classification and SAR interferometry applications. **Tese de doutorado**. Institut fur Hochfrequenztechnik und Radarsysteme Oberpfaffenhofen. 2004, 195p.
- BOERNER, W. M.; EL-ARINI, M. B., CHAN, C. Y., MASTORIS, P. M. Polarization dependence in electromagnetic inverse problems. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, vol. AP-29 (2): pag 262-271, Mar/1981.
- CLOUDE, S.R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in RADAR polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.34, n.2, p.498-518, Mar.1996.
- CLOUDE, S.R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.1, p.68-78, Jan.1997.
- DOBSON, M. C. Forest information from Synthetic Aperture Radar. **Journal of Forestry**. N.98, p.41-43, 2000.
- GAMA, F. F.; SANTOS, J. R.; MURA, J. C; RENNÓ, C. D. Estimativa de parâmetros biofísicos de povoamentos de *Eucalyptus* através de dados SAR. **Ambiência**. Guarapuava, PR, v.2, p.29-42. Edição especial 1, 2006, ISSN 1808-0251.
- HELLMANN M. P. SAR Polarimetry Tutorial (Beta version 0.1a). University of Rennes. Rennes: France, 2001. 109p.
- LEWIS, A. J.; HENDERSON, F. M.; HOLCOMB, D. W **Radar fundamentals: the geoscience perspective**. In Principles and Applications of Imaging Radar. New York: John Wiley. p.131-181, 1998.
- NOVO, E. M. L. M.; COSTA, M. P. F. Fundamentos e aplicações de radar no estudo de áreas alagáveis. Capítulo do Livro: **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de textos, 2005.
- REIGBER, A.; HELLWICH, O. **RAT (Radar Tools): A free SAR image analysis software package**. Acessado no site < http://srv-43-200.bv.tu-berlin.de/publications/pdf/reigber04_rat.pdf > em Nov/2007.
- SANT´ANNA, S. J. S. Avaliação do desempenho de filtros redutores de speckle em imagens de radar de abertura sintética. 1995. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- SANTOS, J. R.; LACRUZ, M. S. P.; ARAÚJO, L. S. Savana and tropical rainforest biomass estimation using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing**. N. 23, p. 1217-1229, 2002.