

Utilização de imagens de coerência interferométrica em banda L para classificação de cobertura da terra na região de Tapajós-PA

Daniel Luís Andrade e Silva^{1,2}
Graziela Balda Scofield²
Sumaia Resegue Aboud Neta²
Rogério Galante Negri²
Luciano Vieira Dutra²
Corina da Costa Freitas²

¹ Diretoria de Serviço Geográfico - DSG
Quartel General do Exército – Bloco “F” - SMU - 70630-901 - Brasília - DF, Brasil
andrade@dsg.inpe.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{graziela, sumaia, rogerio, dutra, corina}@dpi.inpe.br

Abstract. In very humid regions the presence of clouds is constant, which promotes the use of radar, due to the fact of microwaves don't suffer atmospheric interference, allowing the imaging in these areas, regardless of weather conditions in the region. Moreover, the way the radar signal interacts with the targets could allow a better discrimination of features of study. In this context, the objective of the present study is to evaluate the use of interferometric coherence images of the polarimetric radar ALOS/PALSAR to discriminate classes of land cover in the region of the Tapajós National Forest, through supervised region classification using the *Battacharyya* distance. The use of interferometric coherence attribute, measured from the complex correlation coefficient between two images of an interferometric pair, to discriminate classes of land cover in the forest regions is justified by the fact that it is expected low interferometric coherence in areas for typical forests (primary, secondary and regeneration), in contrast to areas of bare soil and land use (agriculture or pasture) that are associated with higher values of coherence. Classifications were made on combinations of interferometric coherence and an intensity images. The *kappa* coefficient of agreement was used to compare the results. It was possible to conclude that the interferometric coherence represented an increase in quality when combined with the intensity image.

Palavras-chave: ALOS PALSAR, correlação complexa, decorrelação temporal, interferometria de dupla passagem, complex correlation, temporal decorrelation, repeat pass interferometry.

1. Introdução

Uma das principais maneiras de se extrair informações sobre uso e cobertura da terra em áreas predominantemente florestais a partir de imagens SAR é a partir da classificação das mesmas. Há diversas abordagens de classificação de imagens SAR de áreas florestais que envolvem diferentes técnicas e dados, os quais podem ser utilizados para, além de discriminar padrões mais gerais de cobertura do solo, detectar desmatamento e diferentes estágios de sucessão.

Dentre as diferentes técnicas, em diversos trabalhos com aplicação de imagens SAR são utilizados classificadores estatísticos supervisionados e não-supervisionados. Alguns trabalhos indicam que imagens polarimétricas, multipolarizadas e combinações de diferentes frequências podem oferecer maior capacidade de discriminação de padrões de cobertura do solo, inclusive desmatamento (Van der Sanden e Hoekman, 1999; Hoekman e Quiñones, 2002). Lee *et al.* (2001) compararam classificações por máxima verossimilhança realizadas com dados em uma polarização, multipolarizados e polarimétricos (intensidade e diferença de fase) nas bandas C, L e P. Neste caso, a classificação mais acurada foi obtida com os dados polarimétricos.

A coerência interferométrica também é utilizada em procedimentos de classificação. Vários trabalhos (Nüesch et al., 1994; Flouri et al., 1996; Dutra e Huber, 1999; Wegmüller e Werner, 1995; Gaboardi, 2002) mostraram a possibilidade de utilização de imagens de coerência interferométrica em conjunto com outros dados SAR ou ópticos para a classificação da cobertura do solo em regiões de florestas.

A utilização da informação de coerência interferométrica para classificação de uso e cobertura do solo se apóia na propriedade apresentada pelas imagens de coerência interferométrica: baixa coerência em áreas de florestas densas, e valores mais altos associados a solo exposto, pastagens, agriculturas e desmatamento em geral. Segundo Gens e Genderen (1996), há maior separabilidade entre floresta e solo exposto nas imagens de coerência do que nas imagens com informações de intensidade e amplitude.

Isto posto, o presente trabalho tratou então de avaliar a utilização de imagens de coerência interferométrica, geradas por processamentos interferométricos feitos com imagens polarimétricas ALOS/PALSAR (banda L) adquiridas com intervalo de tempo de 46 dias, para classificar a cobertura da terra na região da Floresta Nacional do Tapajós/PA. Tal avaliação consistiu em comparações entre resultados obtidos com a utilização dessas imagens de coerência, de polarizações diferentes, e também de uma imagem em intensidade. O classificador utilizado foi o que emprega a classificação por regiões a partir da distância *Battacharyya*, o qual exige uma segmentação preliminar.

2. Coerência interferométrica

As imagens de coerência interferométrica são imagens nas quais cada pixel contém a informação do módulo do coeficiente de correlação complexa, calculado a partir das duas imagens complexas que compõe um par interferométrico. A obtenção das imagens de coerência depende primeiramente de um co-registro preciso, de ordem sub-pixel, das imagens complexas.

Após o co-registro das imagens complexas, deve ser considerado um filtro (janela) de tamanho “n” x “m”, conhecido como filtro *Boxcar*, o qual permite estimar o coeficiente de correlação complexa com base em uma média espacial de “n” x “m” pixels. O coeficiente de correlação complexa é definido pela Equação 1:

$$\gamma = \frac{E[p_1 p_2^*]}{\sqrt{E[|p_1|^2] E[|p_2|^2]}} \quad (1)$$

onde $E[.]$ é o valor esperado e, p_1 e p_2 são, respectivamente, os pixels complexos das imagens 1 e 2 constituintes do par interferométrico. O módulo de $\gamma (|\gamma|)$ é denominado coerência interferométrica.

Na prática, o estimador do coeficiente de correlação complexa é definido pela Equação 2 a seguir:

$$\hat{\gamma} = \frac{\langle p_1 p_2^* \rangle}{\sqrt{\langle |p_1|^2 \rangle \langle |p_2|^2 \rangle}} \quad (2)$$

onde $\langle . \rangle$ indica um operador de média espacial das componentes complexas do sinal, $|\hat{\gamma}|$ é o estimador da coerência interferométrica ($0 \leq |\hat{\gamma}| \leq 1$). A imagem de coerência

interferométrica é então a representação digital de $|\hat{\gamma}|$. As regiões que apresentam maior valor de coerência são as partes mais claras da imagem.

O valor calculado da coerência é relacionado ao desvio-padrão da fase interferométrica. Altos valores de coerência significam que as fases devidas aos espalhadores são estáveis, não apresentando diversidades, traduzindo com isso um espalhamento organizado espacialmente, diferentemente de um espalhamento volumétrico. Baseado nisso, pode-se concluir que alvos que apresentam espalhamento volumétrico, como as florestas densas, contribuem para baixos valores de coerência.

A decorrelação temporal, conhecida também como “*baseline* temporal”, é um dos principais fatores que interferem no cálculo das coerências interferométricas a partir de pares interferométricos adquiridos em passagens repetidas, em virtude das mudanças nas propriedades da superfície imageada ocorridas no período entre as aquisições das imagens constituírem uma das principais causas da decorrelação das mesmas. Como regra geral, pode-se supor que a coerência tende a diminuir com o aumento do intervalo de tempo entre as aquisições do par interferométrico.

Segundo Dutra (2008), além da decorrelação temporal, os fatores que afetam a coerência interferométrica observada são: propriedades do alvo imageado, ângulo de incidência, decorrelação espacial (linha-base), ruídos inerentes ao sistema imageador, diferenças nas órbitas ou no movimento das plataformas aéreas, efeitos climáticos e atmosféricos, processamento dos dados (aquisição e co-registro das imagens complexas), topografia e rotação de *Faraday* (propriedade ondulatória eletro-magnética).

3. Metodologia de Trabalho

3.1 Área de estudo

A área de estudo desse trabalho está situada na Floresta Nacional de Tapajós, no estado do Pará, próxima à localidade de Vila de São Jorge. A vegetação dessa região é composta basicamente por florestas ombrófilas e por algumas áreas de floresta secundária em diferentes estágios de sucessão (Shimabukuro et al., 1997). As áreas desmatadas concentram-se principalmente ao longo da rodovia BR-163 e adjacências. A Figura 1 mostra um extrato da área de estudo e sua localização geográfica.

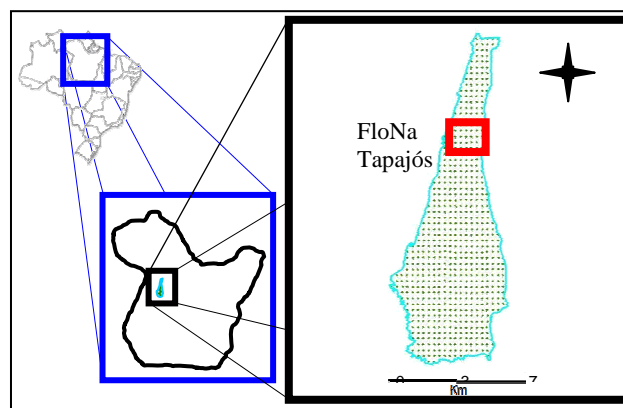


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.

A escolha de tal área de estudo deve-se à grande gama de trabalhos realizados nessa região pelo INPE, assim como a disponibilidade de imagens polarimétricas ALOS/PALSAR, bem como de dados relativos a trabalhos de campo referentes a essa região.

3.2 Imagens utilizadas

As imagens polarimétricas (quatro polarizações) SLC ALOS/PALSAR usadas na geração das imagens de coerência e na conversão para imagem em Intensidade são referentes às datas de 08/03/2007 (imagem 1) e 23/04/2007 (imagem 2), com uma diferença temporal na aquisição entre elas de 46 dias. As imagens de coerência geradas referem-se a imagens co-polarizadas, no caso HH1/HH2 e HV1/HV2. A imagem em Intensidade utilizada para as classificações possui polarização VV.

Foram utilizadas também imagens ópticas TM auxiliares (composição R5G4B3) da data 21/06/2007 com resolução espacial de 30 metros.

3.3 Procedimentos realizados

As imagens de coerência foram geradas a partir de processamentos interferométricos realizados com as imagens polarimétricas citadas na seção anterior utilizando-se o software *SARscape*. Antes de tais processamentos, as imagens foram co-registradas com precisão sub-pixel. O tamanho do filtro *Boxcar* utilizado foi 3x3. Na Figura 2 estão ilustradas as imagens de coerência geradas.

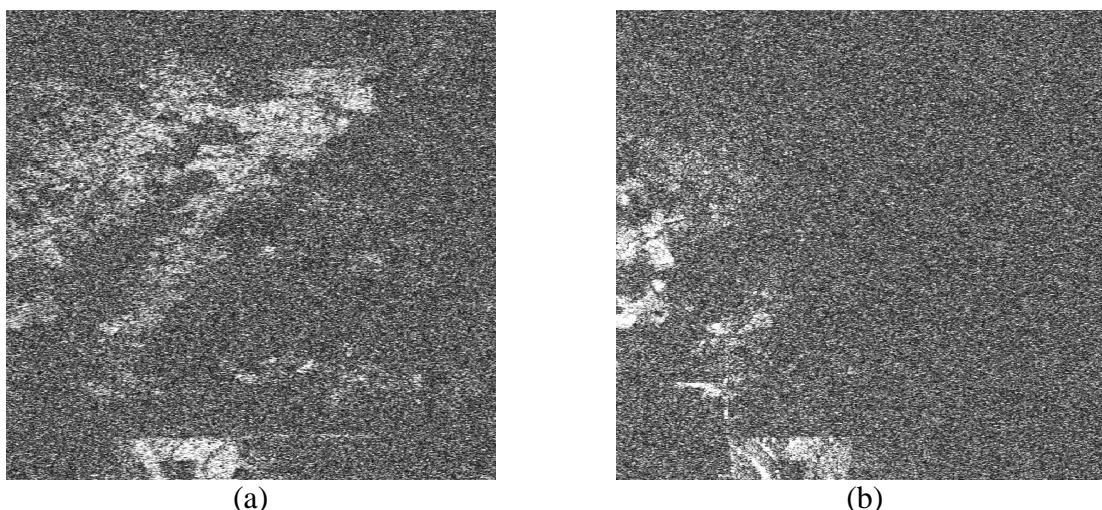


Figura 2. Imagens de coerência: (a) HH1/HH2 ($CoIn_{HH1-HH2}$); (b) HV1/HV2 ($CoIn_{HV1-HV2}$).

A fim de se comparar posteriormente resultados obtidos com as classificações, foi gerada também a imagem em Intensidade relativa à imagem polarimétrica VV2 (I_{VV2}). A imagem em Intensidade I_{VV2} foi gerada com o mesmo espaçamento entre pixels e mesmo número de *looks* da imagem de coerência obtida. Com o intuito de se usar também nesse trabalho as imagens ópticas TM auxiliares para a definição das amostras de treinamento e tornar compatíveis geometricamente com essas imagens os dados SAR utilizados, foram necessárias conversões “*slant to ground range*”, em virtude das imagens polarimétricas serem formadas em *slant range*, apresentando com isso uma geometria de aquisição diferente da imagem óptica. Nessas conversões são informados parâmetros tais como espaçamento entre pixels nas imagens de entrada e de saída, altitude da plataforma, distância “*near-range*” e o tipo de interpolação. O interpolador utilizado foi o vizinho mais próximo. Foi realizada ainda a filtragem de I_{VV2} com a aplicação do filtro *Gamma* de tamanho 5x5, a fim de se reduzir o ruído *speckle*.

As imagens de coerência interferométrica (HH1/HH2 e HV1/HV2), denotadas respectivamente por $CoIn_{HH1-HH2}$ e $CoIn_{HV1-HV2}$, e a imagem em Intensidade filtrada I_{VV2} foram segmentadas no Multiseg (Sousa Jr, 2005). O MultiSeg é um segmentador híbrido, pois utiliza técnicas de crescimento e agrupamento de regiões, ajuste de bordas e separação de regiões não-homogêneas. É multi-níveis, pois utiliza o critério hierárquico de pirâmide; multi-bandas e tanto pode ser aplicado para imagens radar como ópticas. O MultiSeg foi

implementado em linguagem IDL - *Interactive Data Language*, na plataforma ENVI - *The Environment for Visualizing Images*.

Para a segmentação foram definidos os seguintes parâmetros de entrada do MultiSeg:

- modelo de representação dos dados: textura;
- tipo de imagem: óptica, pois a imagem de coerência não apresenta uma distribuição estatística semelhante a qualquer outro dado SAR;
- níveis de compressão: 5;
- área mínima: 40;
- nível de confiança: 95%.

Após as segmentações, as classificações por regiões empregando-se a distância de *Bhattacharyya* foram feitas no SIG *Spring* (Câmara et al., 1996), combinando-se as imagens de coerência juntamente com a imagem em Intensidade. A distância de *Bhattacharyya* mede a similaridade (separabilidade estatística) entre distribuições de probabilidade (Richards, 1986). Para duas classes (i, j) normalmente distribuídas com médias e covariâncias dadas por m_i , m_j , Σ_i e Σ_j , a distância de *Bhattacharyya* é dada por (Equação 3):

$$BD(m_i, m_j) = \frac{1}{8}(m_i - m_j)^t \left\{ \frac{\Sigma_i + \Sigma_j}{2} \right\}^{-1} (m_i - m_j) + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{|\Sigma_i + \Sigma_j|}{2|\Sigma_i|^{1/2} + |\Sigma_j|^{1/2}} \right\}^{-1} \quad (3)$$

As classes definidas (solo exposto, floresta primária, floresta secundária, floresta em regeneração, soja 1 e soja 2) bem como suas amostras representativas para treinamento e validação foram selecionadas com o auxílio de trabalhos de campo realizados em 2005, cujas atualizações foram feitas a partir de consultas às imagens auxiliares TM citadas na seção 3.2.

Na Figura 3 estão mostradas as amostras de treinamento e validação utilizadas nas classificações.

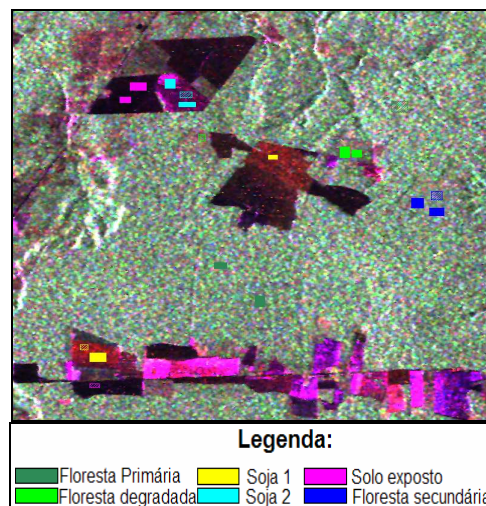


Figura 3. Composição R(HH)G(HV)B(VV) contendo as amostras de treinamento e validação.

Para avaliar a utilização das diferentes informações de coerência interferométrica na discriminação das classes de cobertura da terra, as classificações foram feitas com as seguintes combinações de canais: I_{VV2} ; $I_{VV2} + CoIn_{HH1-HH2}$; e $I_{VV2} + CoIn_{HV1-HV2}$.

4. Resultados e Discussões

Os resultados obtidos com as classificações realizadas das combinações estão mostrados na Figura 4.

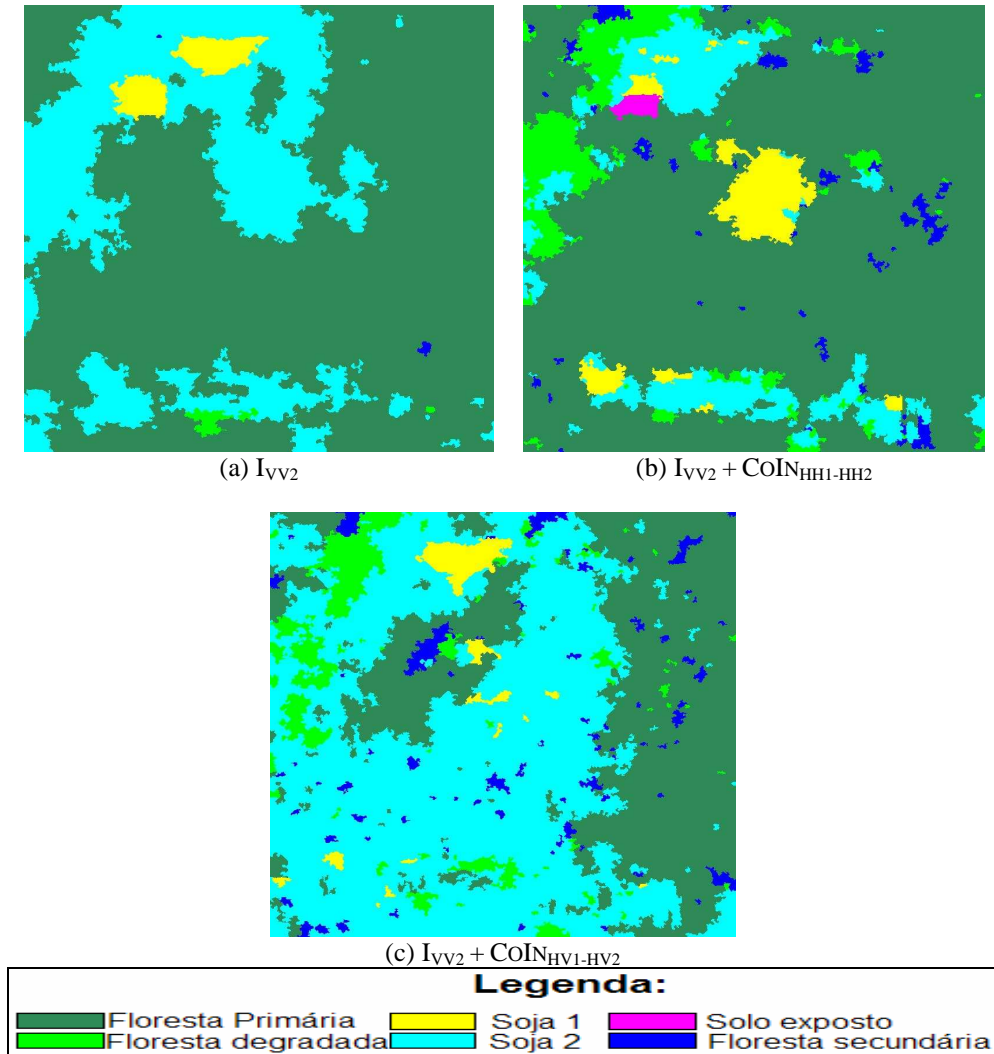


Figura 4. Classificações pela distância de *Bhattacharyya*: (a) I_{VV2} ; (b) $I_{VV2} + COIn_{HH1-HH2}$; (c) $I_{VV2} + COIn_{HV1-HV2}$.

A Tabela 1 apresenta os resultados das medidas de acurácia global, índice *kappa* e sua variância para as classificações realizadas.

Tabela 1. Acurácia das classificações.

Canais	Acurácia	Índice	σ_k^2
	Global (%)	<i>Kappa</i>	(10^{-4})
I_{VV2}	54.23	0.3521	1.77
$I_{VV2} + COIn_{HH1-HH2}$	67.47	0.5244	2.67
$I_{VV2} + COIn_{HV1-HV2}$	65.81	0.5217	2.17

A partir dos resultados obtidos nessas classificações, conclui-se que a classificação $I_{VV2} + CoIn_{HH1-HH2}$ apresentou melhor acurácia global, com uma menor confusão entre as classes, ao passo que a classificação usando apenas I_{VV2} foi o pior desempenho encontrado.

Usando as estatísticas obtidas foram feitos também testes de significância para verificar, com base no parâmetro estatístico *kappa*, se as classificações realizadas são significativamente iguais. Para isso foi adotado um nível de significância de 5% para os testes. Foi possível concluir que as classificações $I_{VV2} + CoIn_{HH1-HH2}$ e $I_{VV2} + CoIn_{HV1-HV2}$ foram significativamente iguais, dado o valor-p obtido igual a 0.54, enquanto as classificações usando as combinações das coerências com a imagem em Intensidade são significativamente diferentes, dados os respectivos valores-p (0.00379 e 0.00612).

Com base nos índices *kappa*, conclui-se que as informações de coerência interferométrica, em relação à imagem de Intensidade, apresentaram um acréscimo de qualidade para discriminar as classes de cobertura da terra.

Comparando-se as imagens 4(a), 4(b) e 4(c), observa-se que áreas de solo exposto não foram classificadas em 4(a) e 4(c) e que a classificação em $I_{VV2} + CoIn_{HV1-HV2}$ discriminou mais áreas de soja 2 do que as outras duas classificações. Áreas de florestas primárias foram mais discriminadas na classificação $I_{VV2} + CoIn_{HH1-HH2}$.

Uma importante observação a ser feita deve-se ao fato de que embora estatisticamente iguais, as classificações $I_{VV2} + CoIn_{HH1-HH2}$ e $I_{VV2} + CoIn_{HV1-HV2}$ visualmente apresentam grandes diferenças. Uma razão para isso poderia ser a inapropriada definição do conjunto de amostras de validação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (3284469/2006-0, 304274/2005-4 e 305546/2003-1), CAPES, FAPESP (2007/02139-5), e JAXA (JAXA-PI 108).

Referências Bibliográficas

Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling", **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

Dutra, L. V.; Huber, R. Feature Extraction and Selection for ERS-1/2 InSAR Classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n.5, p. 993-1016, 1999.

Dutra, L. V. Formulação para cálculo da coerência interferométrica a partir de um produto de fatores de coerência. [mensagem pessoal], 2008.

Flouri, N., Toan, T. L., Souyris, J., Singh, K., Stussi, N., Hsu, C. C., Kong, J. A.. Interferometry for forest studies. **Fringe** 96. [online], 1996.

Gaboardi, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional de Tapajós**. 2002. 139 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Gens, R.; Genderen, J.L.V. SAR interferometry – sigues, techniques, applications. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 10, p. 1803-1835, 1996.

Hoekman, D. H.; Quiñones, M. J. Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n.2, p. 685-696, 2002.

Lee, J. S.; Grunes, M. R.; Pottier, E. Quantitative comparison of classification capability: fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n.11, p. 2343-2351, 2001.

Nüesch, D. R., Sieber, A., Wegmüller, U., Werner, C. L.. Interferometric signatures of temperate forest from ERS-1 SAR data.. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 94., 1994, Pasadena, CA. **Proceedings...** Piscataway, NJ, 1994. CD-ROM

Richards, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction**, 2 ed., Springer-Verlag, Germany, 1993.

Shimabukuro, Y.E. ; Mello, E. M. K.; Moreira, J.C.; Duarte, V. Segmentação e classificação da imagem sombra no modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia. **Relatório Técnico**. São José dos Campos: INPE, p. 16 (INPE – 6147-PUD/029), 1997.

Sousa Jr, M. A. Segmentação multi-níveis e multi-modelos para imagens de radar e ópticas. 133p. **Tese de Doutorado em Computação Aplicada**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2005

Van der Sanden, J. J.; Hoekman, D. H. Potential of airborne radar to support the assessment of land cover in a tropical rain forest environment. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n.1, p. 26-40, 1999.

Wegmüller, U., Werner, C. SAR interferometric signatures of forest. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 5, p. 1153-1161, 1995.