

## Classificador por regiões de imagens SAR com base em distâncias estocásticas derivadas da densidade de probabilidade do par de intensidades *multi-look*

Wagner B. da Silva<sup>1,2</sup>  
Alejandro C. Frery<sup>3</sup>  
Corina da C. Freitas<sup>1</sup>  
Rogerio G. Negri<sup>1</sup>  
Sidnei J.S. Sant'Anna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos - SP, Brasil  
wbarreto, corina, rogerio, sidnei@dpi.inpe.br

<sup>2</sup> Diretoria de Serviço Geográfico  
Quartel General do Exército, Bloco F, 2º Piso, Ala Norte  
Setor Militar Urbano - Brasília - DF, Brasil

<sup>3</sup> Instituto de Computação, Universidade Federal de Alagoas  
BR 104 Norte Km 97, 57072-970 - Maceió - AL, Brasil  
acfrery@pq.cnpq.br

**Abstract.** The development of techniques for synthetic aperture radar (SAR) image classification has advanced significantly, especially when one observes the pixel based and contextual classifiers approach. Region based classification using stochastic distances derived from Information Theory may represent a significant improvement with respect to pixel based classification methods, mainly due to effects caused by speckle noise. This work presents a region based classifier for intensity pair SAR images. This classifier uses the Bhattacharyya distance derived from the multi-look intensity pair density function. Two multi-polarized intensity images (HH and HV) from a tropical forest area (Tapajós, PA) were used as data source. The stochastic distance is computed numerically and follows a methodology for obtaining the class of  $h$ - $\phi$  divergences. The classifier was implemented using the Interactive Data Language (IDL v. 7.1), and the classification was performed on an image segmented by the software SPRING 5.1.5. As a result, the classified image obtained a kappa coefficient of 0.95, from what can be concluded that it offers a good potential in identifying the land cover classes of the study area.

**Keywords:** SAR, region based classifying, stochastic distances SAR, classificação por regiões, distâncias estocásticas

## 1. Introdução

### 1.1. Contextualização

O desenvolvimento de técnicas de classificação de imagens de radares de abertura sintética (SAR) vem avançando significativamente com vistas à extração de informações a respeito da cobertura do solo. Esse avanço torna-se evidente nas abordagens por decomposição polarimétrica e por modelagem estatística. Esta última abordagem, via de regra, adota o modelo multiplicativo, que leva em conta separadamente a contribuição do backscatter e do ruído *speckle*, característico em imagens formadas por iluminação coerente. Importantes resultados de classificação foram obtidos utilizando-se classificadores por modelagem estatística pontuais para imagens SAR com utilização das técnicas da Máxima Verossimilhança (MaxVer) e contextual das Modas Condicionais Iterativas (ICM), como pode ser verificado em Vieira et al. (1996) e Frery, Correia e Freitas (2007).

Entretanto, dada a presença do ruído *speckle*, a utilização da abordagem pontual tende a obter resultados muitas vezes deficientes, em função da textura acentuada que o *speckle* confere às imagens. Para aplicações como a construção de um documento cartográfico, o resultado normalmente demanda edições manuais exaustivas a fim de conferir ao mapa temático gerado o aspecto visual e a qualidade posicional adequados.

A classificação por regiões pode alcançar melhores resultados se comparada aos classificadores pontuais. Com a abordagem por regiões, pode-se esperar que alguns efeitos não desejados, causados por um processo de classificação baseado nas informações de cada elemento de imagem (pixel) separadamente, sejam bastante diminuídos, sobretudo quando se trata de imagens afetadas pelo ruído *speckle*. Dentro deste contexto, torna-se fundamental a busca de novas técnicas para classificação de imagens SAR que utilizem a informação de regiões já agrupadas segundo características próprias semelhantes (segmentos da imagem) ao invés da informação de cada pixel separadamente.

Para a utilização de um classificador por regiões, uma das abordagens mais empregadas é a utilização de distâncias estocásticas, que medem a separabilidade entre as distribuições estatísticas que modelam os segmentos e a distribuições que modelam as amostras de treinamento, representando as classes.

As distâncias estocásticas tem sua base nas medidas que foram desenvolvidas pela *Teoria da Informação*, tendo a sua formalização proposta em Shannon (1948), quando são definidas a *Informação* e a *Entropia*. A partir dessas definições, outros tipos de medidas foram propostas, culminando no desenvolvimento da medida conhecida como *divergência*. A divergência encontra grande aplicação na diferenciação entre distribuições de variáveis aleatórias, podendo ser utilizada geralmente como uma medida de separabilidade entre leis de probabilidade.

Medidas de divergência foram submetidas a um tratamento formal em Csiszar (1967) e em Salicru et al. (1994), resultando na classe de divergências  $\varphi$  e  $h-\phi$ , respectivamente. Através dessas formalizações, podem-se obter diversas distâncias entre distribuições de probabilidade já conhecidas da literatura. Nascimento, Cintra e Frery (2010) utilizam o tratamento formal desenvolvido em Salicru et al. (1994) para obter oito medidas de divergência e distância entre distribuições que modelam dados SAR em intensidade  $G_I^0$  (FRERY et al., 1997).

Ao avaliar a viabilidade de utilização de dados em duas intensidades para classificação do solo na Região Amazônica, Negri (2009) concluiu que a utilização dos dados bivariados (HH e HV) em Banda L do sensor ALOS-PALSAR produz resultados de classificação que não são significativamente diferentes aos obtidos pelos dados polarimétricos completos para determinados níveis de discriminação (números de classe). Essas conclusões são importantes quando se observa o fato de diversas vezes o usuário de imagens não dispor de dados polarimétricos completos, mas apenas de alguns canais em determinadas polarizações, no formatos amplitude ou intensidade. Alguns dos sistemas sensores SAR disponíveis não tem como modo operacional ou nem mesmo produzem dados polarimétricos completos. Como exemplos, podem ser citados o ALOS-PALSAR que, apesar de potencialmente gerar imagens polarimétricas completas, tem como modo operacional a geração de pares de imagens polarimétricas nas polarizações HH e HV. Já o europeu ENVISAT pode gerar imagens em duas combinações de polarizações, mas sem a informação de fase. Quando se dispõe de duas imagens em intensidade, pode-se utilizar como modelagem estatística uma distribuição que é representada pela densidade do *Par de Intensidades Multi-look*, derivada em Lee et al. (1994) a partir da distribuição de Wishart Complexa Multivariada *Multi-look*.

Este trabalho encontra-se no contexto do Projeto *Cartografia da Amazônia* (BRASIL, 2008), lançado pelo Governo Federal em setembro de 2008. Este projeto está subdividido em três subprojetos, dentre os quais está o *Cartografia Terrestre*, que tem como objetivo elaborar

produtos cartográficos (planialtimétricos) nas escalas de 1:100.000 e 1:50.000, em áreas ainda não mapeadas, o chamado *Vazio Cartográfico*. Para a viabilização do subprojeto, estão sendo utilizadas imagens polarimétricas e interferométricas de sensores SAR aerotransportados nas Bandas P e X. Uma das etapas da metodologia de produção desses produtos cartográficos consiste na classificação digital das imagens SAR, fase em que se insere o presente trabalho.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um classificador por regiões para pares de imagens SAR em intensidade baseado na distância estocástica de *Bhattacharyya*, obtida a partir do tratamento para obtenção das divergências e distâncias da classe  $h-\phi$ , formulado em Salicru et al. (1994) e descrito em Nascimento, Cintra e Frery (2010). Os dados utilizados são duas imagens em intensidade multipolarizadas (HH e HV), da região de Tapajós(PA), do sistema SAR ALOS-PALSAR, extraídas de imagens polarimétricas (modo PLR 1.1). Os dados são modelados estatisticamente pela distribuição par de intensidades *multilook*, e a distância é calculada numericamente.

## 1.2. Revisão Bibliográfica

### 1.2.1. Modelagem Estatística dos Dados em Intensidade

Lee et al. (1994) desenvolveram, a partir da densidade que representa a distribuição de *Wishart* complexa multivariada, densidades univariadas e bivariadas para os elementos da matriz de covariância complexa *multilook*. Dentre esses modelos, é de interesse para este trabalho a densidade do Par de Intensidades *multi-look*.

Sejam duas imagens em intensidade *multi-look*  $Z_1$  e  $Z_2$  componentes da diagonal principal da matriz de covariância. A densidade do Par de Intensidades *multi-look* é definida pela equação (1):

$$f_{Z_1, Z_2}(z_1, z_2) = \frac{N^{N+1} (z_1 z_2)^{\frac{N-1}{2}} \exp\left\{-\frac{N\left(\frac{z_1}{h_{11}} + \frac{z_2}{h_{22}}\right)}{1-|\rho_c|^2}\right\}}{(h_{11} h_{22})^{\frac{N+1}{2}} \Gamma(N) (1-|\rho_c|^2) |\rho_c|^{N-1}} I_{N-1}\left(\frac{2N|\rho_c|}{1-|\rho_c|^2} \sqrt{\frac{z_1 z_2}{h_{11} h_{22}}}\right), \quad (1)$$

em que  $h_{11} = E[Z_1]$ ,  $h_{22} = E[Z_2]$  e  $\rho_c$  (coeficiente de correlação complexo) são os parâmetros desconhecidos que indexam a distribuição,  $I_\nu$  é a função modificada de Bessel de ordem  $\nu$ , e  $N$  é o número equivalente de looks (NEL), que corresponde ao número de amostras independentes utilizadas no processamento *multi-look* das imagens SAR. Diversos métodos de estimação do  $N$  utilizando os dados podem ser consultados em Frery, Correia e Freitas (2007), Lee e Pottier (2008) e Anfinsen, Doulgeris e Eltoft (2009), e neste trabalho o supremo conhecido ou estimado a priori.

Lee et al. (1994) provam que  $|\rho_c|^2$  é igual ao coeficiente de correlação dos dados em intensidade ( $\rho_I$ ). Como descrito em Correia (1998), para cada região, os parâmetros  $h_{11}$ ,  $h_{22}$  e  $|\rho_c|$  podem ser estimados através da utilização de uma amostra de tamanho  $r$ , de acordo com as equações (2), (3) e (4):

$$\hat{h}_{11} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r Z_{1i}, \quad (2)$$

$$\hat{h}_{22} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r Z_{2i}, \quad (3)$$

$$|\hat{\rho}_c| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r [(Z_{1i} - \hat{h}_{11})(Z_{2i} - \hat{h}_{22})]}{\sum_{i=1}^r [(Z_{1i} - \hat{h}_{11})^2] \sum_{i=1}^r [(Z_{2i} - \hat{h}_{22})^2]}}. \quad (4)$$

### 1.2.2. Distâncias Estocásticas

Nascimento, Cintra e Frery (2010) apresentaram a formulação teórica de medidas de distância obtidas a partir da divergência  $h$ - $\phi$ , que foi desenvolvida por Salicru et al. (1994). Sejam duas variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$  com o mesmo suporte  $S$  e funções densidade de probabilidade  $f_X$  e  $f_Y$ . A divergência  $h$ - $\phi$  é dada por:

$$D_{\phi}^h(X, Y) = h \left( \int_{x \in S} \phi \left( \frac{f_X(x; \theta_1)}{f_Y(x; \theta_2)} \right) f_Y(x; \theta_2) dx \right), \quad (5)$$

em que  $S$  é a união dos suportes das duas densidades,  $\phi: (0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$  é uma função convexa,  $h: (0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$  é uma função estritamente crescente com  $h(0) = 0$  e  $h'(x) > 0$  para todo  $x \in \mathfrak{R}_+$ , e  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são vetores de parâmetros das duas distribuições de probabilidade. A partir da escolha das funções  $\phi$  e  $h$  podem ser obtidas diversas medidas de divergência conhecidas (NASCIMENTO; CINTRA; FRERY, 2010).

As medidas de divergência podem não obedecer às exigências para serem consideradas métricas, sobretudo no que diz respeito à simetria e à desigualdade triangular. No que diz respeito ao problema da simetria, uma solução simples, descrita em Nascimento, Cintra e Frery (2010) e mostrada na equação (6) pode ser útil para obtenção de distâncias ( $d_{\phi}^h(X, Y)$ ) a partir das divergências:

$$d_{\phi}^h(X, Y) = \frac{D_{\phi}^h(X, Y) + D_{\phi}^h(Y, X)}{2}. \quad (6)$$

Para este trabalho, é utilizada a distância estocástica de *Bhattacharyya* ( $d_B(X, Y)$ ), tendo em vista a sua utilização clássica nas aplicações de Sensoriamento Remoto. A partir da aplicação da metodologia mencionada na subseção 1.2.2, a distância de *Bhattacharyya* é formulada por Nascimento, Cintra e Frery (2010) de acordo com a equação (7). Por questões de simplificação, são omitidas a dependência da variável e o suporte na fórmula da integral:

$$d_B(X, Y) = -\log \left( \int \sqrt{f_X f_Y} \right), \quad (7)$$

Não foi possível a obtenção de uma fórmula analiticamente fechada para a distância de *Bhattacharyya*, tendo em vista a complexidade da densidade do par de intensidades *multi-look*. Adotou-se então uma solução por métodos numéricos baseada em quadratura gaussiana iterativa, disponível na linguagem IDL 7.1 (ITT, 2009) para resoluções de integrais duplas na obtenção dos valores de distância.

## 2. Material e Método

### 2.1. Área de Estudo

A imagem selecionada para o estudo corresponde, ao leste da Floresta Nacional de Tapajós, no Estado do Pará, aproximadamente entre as coordenadas S 2° 46' 32" e O 55° 16' 21", e S 3° 18' 24" e O 54° 47' 44". A escolha da região da Floresta Nacional de Tapajós como área de estudo se deve ao grande conhecimento acumulado através dos trabalhos realizados pelo INPE neste local, além da disponibilidade das imagens.

### 2.2. Imagem ALOS/PALSAR

Foi utilizada, para a classificação, uma imagem ALOS PALSAR em modo de operação PLR e nível de operação 1.1, de 23/04/2007. A imagem utilizada foi extraída de Negri (2009), trabalho onde foi reamostrada de *slant range* para *ground range* e passou por processamento

*multi-look*. Para este trabalho foram utilizados os canais de intensidade HH e HV, extraídos dos dados completos. A figura 1 apresenta uma composição colorida RGB, feita com os canais de intensidade (composição: R - HH, G - HV e B - HH), representando a imagem utilizada no trabalho.

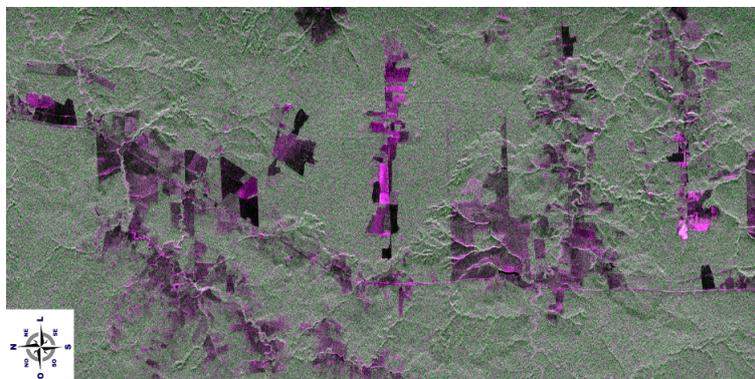


Figura 1: Imagem ALOS PALSAR utilizada no trabalho - composição R-HH, G-HV e B-HH - Data: 23/04/2007

### 2.3. Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido seguindo as seguintes etapas:

**Preparação da imagem para a classificação** A imagem ALOS PALSAR PLR 1.1 foi reamostrada de *slant range* para *ground range* e passou por processamento *multi-look* em Negri (2009). Foram selecionados os canais de intensidade nas polarizações HH e HV para utilização com o classificador desenvolvido. Foi gerada também uma imagem filtrada com filtro Enhanced Frost, janela  $5 \times 5$ , e reamostrada para oito bits, no ENVI 4.7 para utilização no segmentador do SPRING 5.1.5. Esta filtragem foi realizada visando a aproximação da modelagem dos dados com uma distribuição gaussiana multivariada, modelo estatístico utilizado pelo segmentador do SPRING.

**Seleção de amostras de treinamento e validação** Foram utilizadas as mesmas amostras selecionadas em Negri (2009), em que foi desenvolvida uma metodologia para verificação da separabilidade entre as diversas amostras coletadas nas imagens. A partir dos resultados da verificação, foram definidas as seguintes classes para este trabalho:

- classe 1 - Floresta primária, floresta degradada, regeneração antiga, regeneração intermediária e regeneração nova;
- classe 2 - Pasto sujo e pasto limpo;
- classe 3 - Solo exposto;
- classe 4 - Agricultura 1;
- classe 5 - Agricultura 2.

**Segmentação da imagem** A imagem filtrada foi segmentada no SPRING 5.1.5 através do método crescimento de regiões. Dentre diversas combinações de parâmetros, a que apresentou melhor resultado foi a de similaridade igual a 20 e área mínima igual a 300.

**Classificação por Regiões** As etapas realizadas para a classificação foram as seguintes:

- Estimaco dos parâmetros para as amostras de treinamento: os parâmetros do modelo estatístico utilizado (médias das duas imagens em intensidade e módulo do coeficiente de correlaco complexo entre as mesmas), apresentados na seo 1.2.1, so estimados para as amostras de treinamento coletadas no ENVI.
- Estimaco dos parâmetros para os segmentos: também ocorre a estimaco dos parâmetros para cada segmento da imagem segmentada.
- Número equivalente de *looks* (NEL): é informado ao classificador o número equivalente de looks, estimado previamente utilizando-se o classificador polarimétrico desenvolvido em Frery, Correia e Freitas (2007). No caso dos dados utilizados, o NEL foi estimado em 2.3.
- Clculo da distncia de *Bhattacharyya*: A distncia é calculada entre cada segmento e todas as classes definidas no treinamento. O clculo é realizado por métodos numéricos, dada a complexidade analítica que envolve a soluo da distncia entre densidades do par de intensidades *multi-look*. É utilizada uma modificaco da funo INT\_2D, do IDL 7.1, que resolve numericamente integrais duplas utilizando Quadratura Gaussiana Iterativa.
- Verificaco da menor distncia entre cada segmento e cada classe: Verifica-se qual a classe cuja distribuico apresentou a menor distncia em relaco à distribuico que modela os dados de cada segmento.
- Classificaco de cada segmento na classe de menor distncia.

**Avaliaco do resultado da classificaco** Foram calculados a matriz de confuso, a acurácia global e o coeficiente de determinaco *kappa* da imagem classificada, utilizando-se as amostras de validaco coletadas por Negri (2009).

### Comparaco com os resultados obtidos utilizando-se o classificador pontual/Contextual

Os resultados da classificaco foram comparados com os resultados obtidos pela classificaco pontual/contextual (mxima verossimilhana/ICM) utilizando-se o classificador polarimétrico desenvolvido em Frery, Correia e Freitas (2007). Os resultados da classificaco pontual/contextual foram extraídos de Negri (2009).

### 3. Resultados

A Tabela 1 mostra os valores de acurácia global e coeficiente de determinaco *kappa* para o resultado obtido pelo classificador por regies para pares de imagem em intensidade multi-look e para a imagem classificada pelo classificador pontual/contextual MaxVer/ICM desenvolvido por Frery, Correia e Freitas (2007). Em ambos casos foram empregadas cinco classes.

Tabela 1: Coeficiente de determinaco *kappa* e acurácia global dos resultados do classificador por regies e do classificador MaxVer/ICM.

| Classificador                        | <i>kappa</i> | Varincia do <i>kappa</i> | Acurácia Global |
|--------------------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| por regies ( <i>Bhattacharyya</i> ) | 0,95         | $7,3 \cdot 10^{-6}$       | 97,22%          |
| MaxVer/ICM                           | 0,89         | $1,7 \cdot 10^{-5}$       | 92,73%          |

A Figura 2 mostra a um extrato da composico RGB da imagem par de intensidades com as amostras de treinamento, a imagem segmentada, o resultado de classificaco MaxVer/ICM e o resultado de classificaco por regies e *Bhattacharyya*.

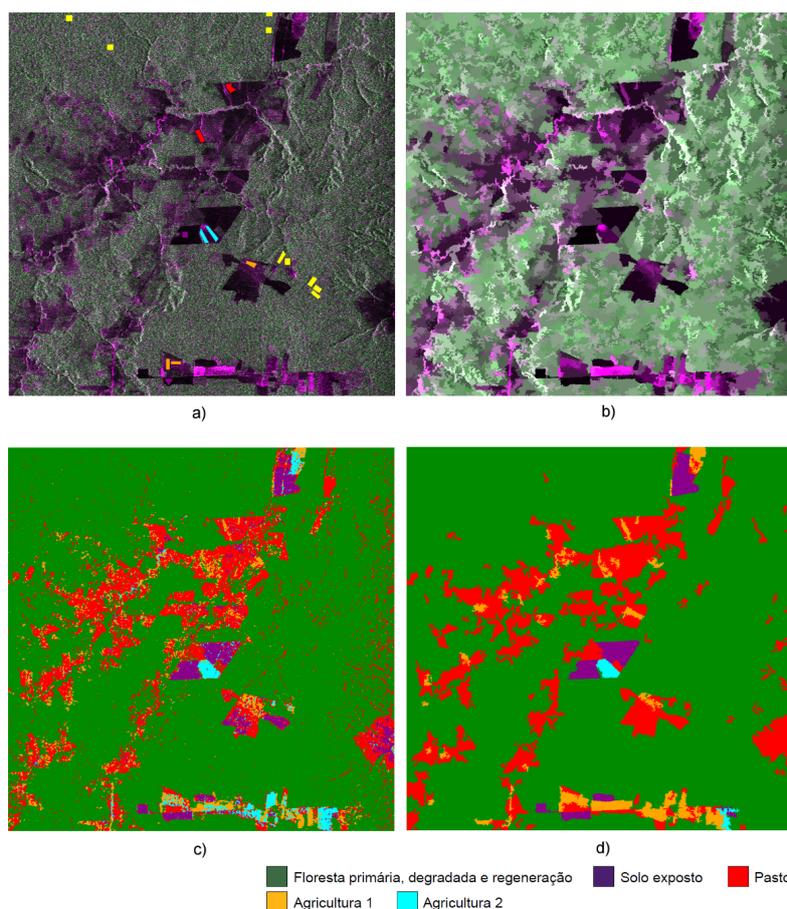


Figura 2: a) composição RGB da imagem par de intensidades com as amostras de treinamento, b) Imagem segmentada (valores médios de cada segmento), c) Classificação MaxVer/ICM, d) Classificação por regiões e distância de *Bhattacharyya*

Os resultados mostram que a imagem classificada pelo classificador de regiões com distância de *Bhattacharyya*, além de obter um coeficiente *kappa* significativamente maior, apresenta uma minimização nas pequenas áreas, inerentes à classificação por métodos pontuais. Mesmo a utilização do contexto não consegue eliminar esse efeito, que é acentuado pela influência do ruído *speckle*, nessas imagens SAR.

#### 4. Conclusões

Tendo em vista que o coeficiente de concordância *kappa* para o resultado de classificação foi 0,95, contra 0,89 do resultado obtido pelo classificador MaxVer/ICM, conclui-se que o classificador desenvolvido apresenta bom potencial de identificação das classes de cobertura na área de estudo. Comparando-se visualmente os resultados de classificação, identifica-se uma redução das pequenas áreas nos resultados de classificação com a utilização do classificador por regiões, que se mostra, também sob uma avaliação visual, vantajoso em relação ao classificador MaxVer/ICM.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ (302966/2009-9) e ao *National Science Foundation* (NSF-grant #BCS 0850615) pelo suporte financeiro.

## Referências

- ANFENSEN, S.; DOULGERIS, A.; ELTOFT, T. Estimation of the equivalent number of looks in polarimetric synthetic aperture radar imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 47, n. 11, p. 3795–3809, 2009. ISSN 0196-2892.
- BRASIL. *Projeto Cartografia da Amazônia*: Documento de referência. Brasília: Presidência da República, Casa Civil, Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia, setembro 2008. 63 p.
- CORREIA, A. H. *Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas*. 271 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1998.
- CSISZAR, I. Information-type measures of difference of probability distributions and indirect observations. *Studia Sci. Math. Hungar.*, v. 2, p. 299–318, 1967.
- FRERY, A. C.; CORREIA, A. H.; FREITAS, C. d. C. Classifying multifrequency fully polarimetric imagery with multiple sources of statistical evidence and contextual information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing - GIM International*, v. 45, n. 10, p. 3098–3109, 2007.
- FRERY, A. C. et al. A model for extremely heterogeneous clutter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35, n. 3, p. 648–659, 1997.
- ITT. *IDL Reference Guide*. May 2009. [S.l.], 2009.
- LEE, J.; POTTIER, E. *Polarimetric radar imaging: From basics to applications*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2008.
- LEE, J.-S. et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 32, n. 5, p. 1017–1028, Sep 1994. ISSN 0196-2892.
- NASCIMENTO, A.; CINTRA, R.; FRERY, A. Hypothesis testing in speckled data with stochastic distances. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 48, n. 1, p. 373–385, 2010. ISSN 0196-2892.
- NEGRI, R. G. *Avaliação de dados polarimétricos do sensor ALOS PALSAR para classificação da cobertura da terra da Amazônia*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, maio 2009.
- SALICRU, M. et al. On the applications of divergence type measures in testing statistical hypotheses. *Journal of Multivariate Analysis*, v. 51, n. 2, p. 372–391, November 1994.
- SHANNON, C. A mathematical theory of communication. *Bell System Tech.*, v. 27, p. 379–423, 1948.
- VIEIRA, P. R. et al. Um sistema de análise e classificação estatísticas para imagens sar. In: LATIN-AMERICAN SEMINAR ON RADAR SENSING, 1., 2-4 dec. 1996, Buenos Aires, AR. *Image Processing Techniques*. [S.l.], 1996. p. 179–185.