

Calibração preliminar dos dados SAR polarimétricos em banda L do sensor R99B do CENSIPAM

José Claudio Mura
Antonio Henrique Correia
Paulo Honda

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
correia,mura,honda@dpi.inpe.br

Abstract. This paper describes the methodology applied to calibrate the polarimetric L-band SAR images of the CENSIPAM airborne sensor R99B. The calibration was done in three steps, the first one was the antenna pattern correction, the second was the polarimetric calibration and the last one was the estimation of the sigma nought based on the response of the trihedral corner reflectors deployed in two area test on the Tapajós Forest and Coari (Brazilian Amazon).

Palavras-chave: calibração, SAR, polarimetria, banda L, sigma zero

1 - Introdução

A calibração é a base para a comparação de diferentes conjuntos de dados, possibilitando a extração de informações qualitativas e quantitativas das imagens SAR. Os sistemas SAR polarimétricos (PolSAR) adquirem a matriz de espalhamento de cada elemento de resolução da cena imageada. A informação contida neste tipo de dado tem uma ampla gama de aplicações em diversas áreas, tais como, agricultura, geologia, oceanografia, floresta, etc. A calibração radiométrica das imagens PolSAR, dependendo das aplicações, engloba a fase de correção do padrão da antena, correção das distorções do sistema PolSAR (calibração polarimétrica), e obtenção dos valores de retroespalhamento médio (σ^0) dos alvos (calibração absoluta). A calibração polarimétrica compreende a determinação das amplitudes e fases relativas entre as distorções dos canais do sistema PolSAR (*channel imbalance*) e a determinação da contaminação de um canal polarimétrico em outro (*cross-talk*), constituindo uma tarefa essencial para uma melhor extração da informação neste tipo de dado SAR. Neste trabalho é apresentada a metodologia utilizada para a calibração preliminar das imagens polarimétricas em banda L do sensor R99B do CENSIPAM, adquiridas no modo QUAD L (HH, VV, HV e VH) com 6 metros de resolução, com ângulo de incidência variando de 39,6 a 71 graus. O padrão para a correção radiométrica das imagens foi obtido a partir da determinação da variação dos valores de radiometria sobre áreas extensas de floresta homogênea. A calibração polarimétrica do *cross-talk* e do *channel imbalance* foram realizadas segundo o método de Quegan (1994), utilizando-se como referência a resposta polarimétrica de refletores de canto do tipo triedro. A transformação das imagens calibradas em valores de σ^0 , foi realizada segundo o método do pico de potência, Gray et al. (1990), utilizando a resposta de pico de refletores de canto do tipo triedro como referência, instalados nas áreas de Coari-AM e de Tapajós-PA.

2 - Correção do Padrão da Antena

O padrão para a correção radiométrica, ou padrão de correção da antena, foi obtido a partir da determinação do perfil da soma das colunas das componentes em amplitude HH, VV, HV e VH de uma imagem polarimétrica em uma área homogênea de floresta. Para que não houvesse influência de algum padrão de correção aplicado durante a geração das imagens,

estas foram geradas sem a opção de correção do padrão da antena. Na **Figura 1** é apresentado o perfil na direção de alcance (radial), da soma das colunas das imagens em amplitude HH, VV, HV e VH da região de Coari, ajustadas por polinômio do 7º grau, utilizadas na correção em questão.

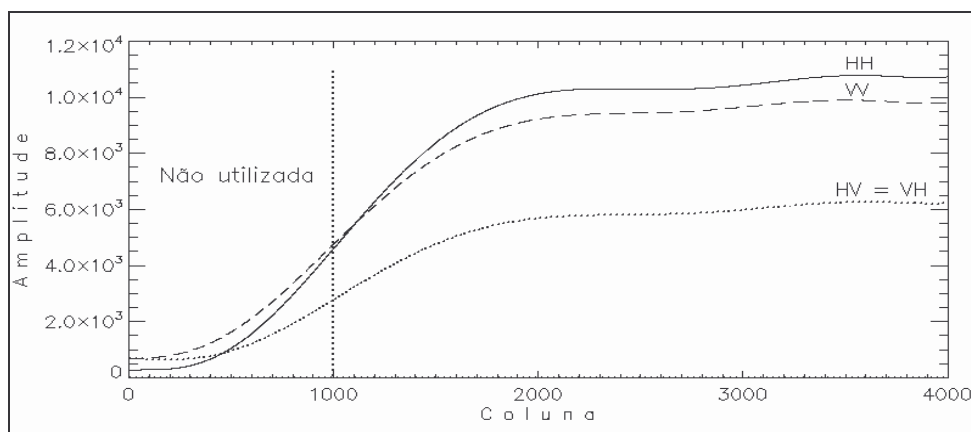


Figura 1 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Coari-AM.

A correção radiométrica de cada imagem, com base no padrão da antena estimado, foi baseada no método multiplicativo, ou seja, cada pixel da imagem de uma dada coluna é multiplicado pelo valor médio do perfil e dividido pelo valor do perfil correspondente à mesma coluna da imagem. Esta técnica garante uma homogeneização do brilho da imagem no sentido de alcance. Uma parte da imagem, correspondente ao alcance próximo, não foi utilizada, como mostra a **Figura 1**, pois os valores radiométricos baixos nesta faixa possuem estatísticas diferentes dos alvos equivalentes localizados no restante da faixa utilizada.

3 - Calibração Polarimétrica

Um sistema SAR polarimétrico mede, para cada elemento de resolução da cena imageada uma matriz de espalhamento $[S]$. A matriz $[S]$ ideal somente é obtida se os canais do sistema SAR estiverem com o mesmo ganho, com uma diferença de fase independente do sistema, e sem contaminação de energia de um canal para o outro. Nos sistemas SAR polarimétricos a situação ideal não acontece, tornando-se imprescindível o processo de calibração. As distorções impostas pelo sistema SAR sobre a matriz $[S]$ podem ser modeladas por meio da seguinte equação (Freeman et al.,1990):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix}}_{[O]} = A e^{i\varphi} \underbrace{\begin{bmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{bmatrix}}_{[R]} \underbrace{\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}}_{[S]} \underbrace{\begin{bmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{bmatrix}}_{[T]} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{bmatrix}}_{[N]} \quad (3.1)$$

onde $[O]$ é a matriz de espalhamento observada, A é o ganho global do sistema, φ representa qualquer desvio de fase devido a distância alvo-sensor e perdas no interior do sistema, $[R]$ e $[T]$ são, respectivamente, as matrizes complexas de distorção de recepção e de transmissão, e a matriz $[N]$ representa um ruído aditivo devido à radiação da Terra, flutuações termais no receptor e ruído de digitalização. Segundo Van Zyl et al. (1990), a fase absoluta φ é perdida quando a potência recebida é calculada no decorrer do processo de síntese da imagem, o que elimina a necessidade de calibração da fase em questão.

Os termos r_{jk} e t_{jk} da equação 3.1, para $j \neq k$, representam uma determinada quantidade de energia que uma antena interfere na outra, tanto na transmissão quanto na recepção do sinal, denominado de *cross-talk*. Os termos r_{jj} e t_{jj} da equação 3.1 representam o desequilíbrio que ocorre entre as amplitudes e fases dos canais H e V, durante a transmissão e a recepção, denominado de *channel imbalance*. Uma das causas desse problema é decorrente da diferença entre os caminhos de transmissão e recepção das duas polarizações, o que acarreta a introdução pelo sistema SAR de duas novas fases, $\phi_r = \phi_{r,h} - \phi_{r,v}$ e $\phi_t = \phi_{t,h} - \phi_{t,v}$, representadas na **Figura 2**, que devem ser minimizadas.

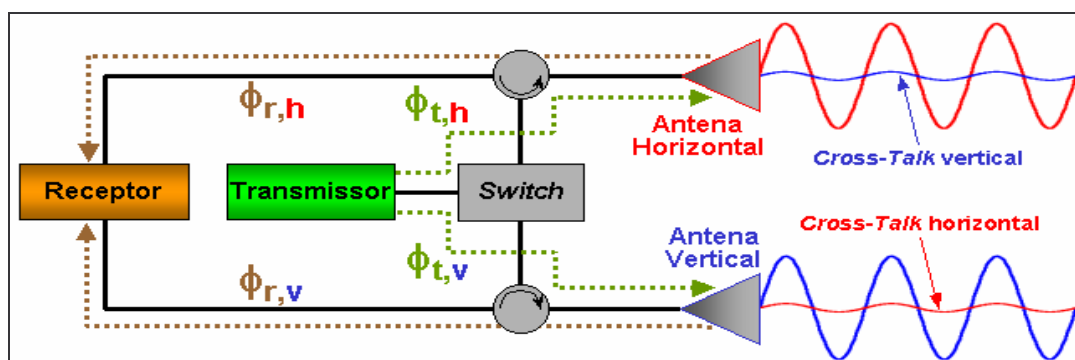


Figura 2 - Representação esquemática das fases devido ao caminho do sinal no sistema SAR polarimétrico. Fonte: Modificada de Zebker e Lou (1990).

O método utilizado, proposto por Quegan (1994), para a calibração do *cross-talk* e do *channel imbalance* é baseado na matriz de covariância observada, $[Co] = \langle \bar{o}_{4L} \bar{o}_{4L}^+ \rangle$, onde \bar{o}_{4L} representa a vetorização lexográfica da matriz $[O]$, e nas seguintes suposições:

- (1) Existe reciprocidade na cena imageada, ou seja, $[S] = [S]^T$ ou $S_{hv} = S_{vh}$;
- (2) Os valores r_{jk} e t_{jk} (onde $j \neq k$) são bem menores que os termos r_{jj} e t_{jj} ;
- (3) Para alvos distribuídos aleatoriamente com simetria azimutal em relação a linha de visada do radar, direção de alcance, as componentes cruzadas e co-polarizadas da matriz $[S]$ são descorrelacionados, ou seja, $\langle S_{ij} S_{jk}^* \rangle = 0$, onde $j \neq k$ e $j, k = h, v$;
- (4) O ruído é simétrico ($n_{hv} = n_{vh}$), não correlacionado com o sinal e não correlacionado entre canais;
- (5) As matrizes de covariância de $[S]$, $[O]$ e $[N]$ podem ser aproximadas pela média espacial sobre uma região da imagem SAR.

Com base nas suposições (1) e (2), a equação 3.1 pode ser reescrita com os seguintes parâmetros:

$$\bar{o}_{4L} = \begin{bmatrix} O_{hh} \\ O_{hv} \\ O_{vh} \\ O_{vv} \end{bmatrix} = Y \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & v + \alpha w & vw \\ \alpha z & 1 & w \\ \alpha z & \alpha & v \\ \alpha u z & u + \alpha z & 1 \end{bmatrix}}_{[M_1]} \underbrace{\begin{bmatrix} k^2 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{[M_2]} \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{hh} \\ n_{hv} \\ n_{vh} \\ n_{vv} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde $u = r_{vh}/r_{hh}$, $v = t_{vh}/t_{vv}$, $w = r_{hv}/r_{vv}$ e $z = t_{hv}/t_{hh}$ são as razões do *cross-talk*, $Y = r_{vv}t_{vv}$ é o ganho total do canal vertical, $k = r_{hh}/r_{vv}$ é o *channel imbalance* de recepção e $\alpha = (r_{vv}t_{hh})/(r_{hh}t_{vv})$ é a razão entre o *channel imbalance* de recepção e transmissão. Com base nas suposições (3), (4) e (5), a matriz de covariância observada, $[Co]$, pode ser escrita como:

$$[Co] = \langle \bar{o}_{4L} \bar{o}_{4L}^\dagger \rangle = [M] \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{hh} & 0 & \sigma_{hhvv} \\ 0 & \sigma_{hv} & 0 \\ \sigma_{hhvv}^* & 0 & \sigma_{vv} \end{bmatrix}}_{[Cs]} [M]^\dagger + \underbrace{\begin{bmatrix} N_{hh} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{hv} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{hv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{vv} \end{bmatrix}}_{[Cn]} \quad (3.3)$$

onde $[M] = [M_1][M_2]$, $\sigma_j = \langle |S_j|^2 \rangle$, $\sigma_{jk} = \langle S_j S_k^* \rangle$ e $N_j = \langle |n_j|^2 \rangle$, $j, k = \{hh, hv, vv\}$, e \dagger e $\langle \rangle$ denotam os operadores hermitiano e somatório, respectivamente.

Desprezando-se a matriz $[Cn]$ da equação 3.3, os parâmetros u , v , w e z podem ser obtidos por meio dos elementos da matriz de covariância observada $[Co]$, empregando-se as seguintes equações (Quegan, 1994):

$$\begin{cases} u = (Co_{44}Co_{21} - Co_{41}Co_{24})/\Delta \\ v = (Co_{11}Co_{24} - Co_{21}Co_{14})/\Delta \\ z = (Co_{44}Co_{31} - Co_{41}Co_{34})/\Delta \\ w = (Co_{11}Co_{34} - Co_{31}Co_{14})/\Delta \end{cases} \quad (3.4)$$

onde $\Delta = Co_{11}Co_{44} - |Co_{14}|^2$, e os subscritos $\{1,2,3,4\} = \{hh,vh,hv,vv\}$.

Enquanto que os parâmetros u , v , w e z apresentam uma única solução, o parâmetro α , em virtude da equação 3.3 apresentar um número maior de equações que incógnitas, possui duas soluções complexas (α_1 e α_2), de mesma fase e amplitudes diferentes. A amplitude e fase do parâmetro α são calculadas por meio das seguintes expressões (Quegan, 1994):

$$\begin{cases} |\alpha| = \frac{|\alpha_1\alpha_2| - 1 + \sqrt{(\alpha_1\alpha_2 - 1)^2 + 4|\alpha_2|^2}}{2|\alpha_2|} \\ Arg(\alpha) = Arg(\alpha_1) = Arg(\alpha_2) \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{onde } \alpha_1 = \frac{Co_{22} - uCo_{12} - vCo_{42}}{Co_{32} - zCo_{12} - wCo_{42}} \quad \text{e} \quad \alpha_2 = \frac{(Co_{32} - zCo_{12} - wCo_{42})^*}{Co_{33} - z^*Co_{31} - w^*Co_{34}} \quad (3.6)$$

Considerando-se que a calibração do *cross-talk*, simbolizada pela matriz $[M]$, já tenha sido realizada, pode-se relacionar a matriz de espalhamento observada corrigida $[\tilde{O}]$ com os parâmetros Y e k , por meio da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \tilde{O}_{hh} & \tilde{O}_{hv} \\ \tilde{O}_{vh} & \tilde{O}_{vv} \end{bmatrix} = AY \begin{bmatrix} k^2 S_{hh} & kS_{hv} \\ kS_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Desprezando-se o ruído na equação 3.7 e utilizando-se refletores de canto do tipo triedro, onde $S_{hh} = S_{vv} = \sqrt{\sigma^{\text{tri}}}$ e $\text{Arg}(S_{hh}S_{vv}^*) = 0$, pode-se estimar a amplitude e a fase do parâmetro k , da seguinte forma:

$$|k| = \left(\frac{|\tilde{\sigma}_{hh}|}{|\tilde{\sigma}_{vv}|} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ e } \text{Arg}(k) = \frac{1}{2} [\text{Arg}(\tilde{\sigma}_{hh} \tilde{\sigma}_{vv}^*)] \quad (3.8)$$

É importante observar que a existência na imagem SAR de alvos que possuam a diferença de fase HH-VV conhecida, que é o caso de refletores de canto, pois possibilita a correção da distorção de fase induzida pelo parâmetro k . Desta forma, o método de Quegan (1994) permite a calibração de fase simultaneamente com a calibração do *cross-talk*.

No presente trabalho, o valor médio estimado para o parâmetro α foi de 0,9938, o que indica que o sistema R99B SAR apresenta valores dentro do previsto, ou seja, próximos de 1, conforme descrito em Quegan (1994). Os valores médios (em dB) obtidos para os parâmetros do *cross-talk* foram $u = -29,11$, $v = -30,99$, $w = -30,42$ e $z = -29,99$, o que demonstra a pequena contaminação de energia que existe entre os canais H e V, conforme pode ser visto na **Figura 3**, onde a calibração do *cross-talk* pouco alterou a resposta polarimétrica dos refletores, em relação ao dado não calibrado.

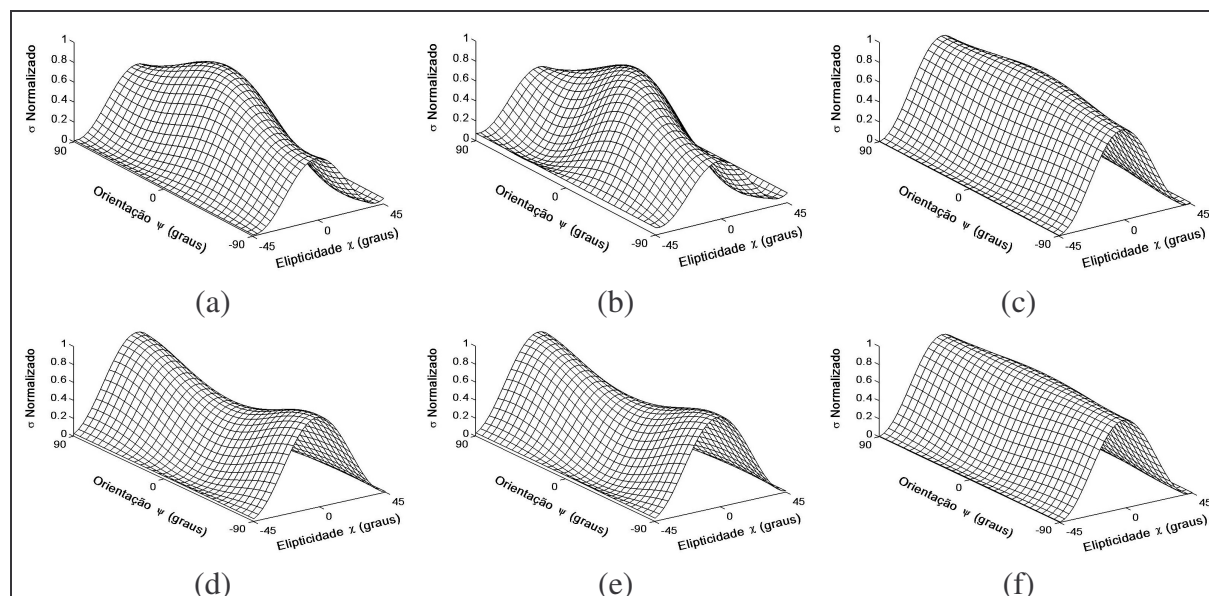


Figura 3 – Respostas polarimétricas de dois refletores de canto triédricos instalados em Coari-AM (acima) e Tapajós-PA (abaixo): (a) e (d) antes da calibração, (b) e (e) após a remoção do *cross-talk*, e (c) e (f) após a remoção do *channel imbalance*.

Com base nos refletores de canto triédricos instalados, 3 na região de Coari-AM e 9 na região de Tapajós-PA, foram obtidos, após a calibração do *cross-talk*, os valores de amplitude do *channel imbalance* entre as componentes HH e VV, conforme apresentado na **Figura 4**. Pode-se observar na **Figura 4**, com base na função polinomial de interpolação de 1º grau, que os valores estimados de *channel imbalance* estão bem próximos e praticamente constantes para os dois sensores.

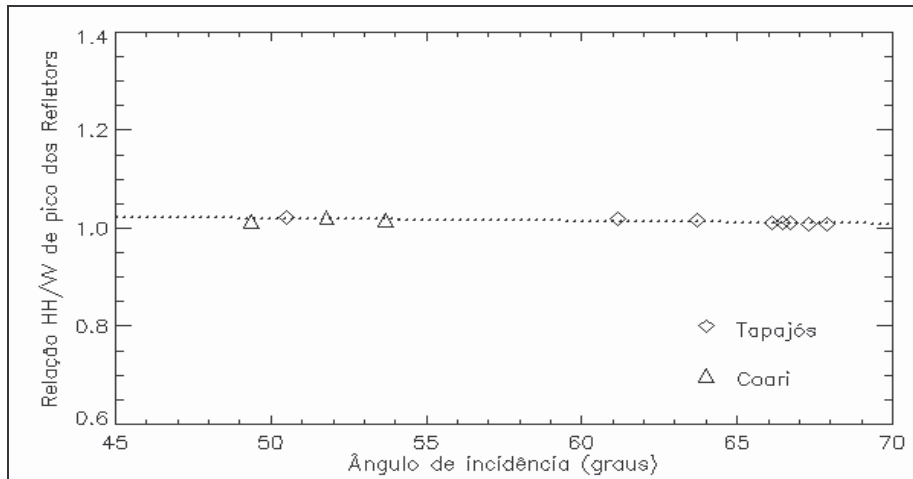


Figura 4 – Amplitude do *channel imbalance* em função do ângulo de incidência.

Na Figura 3 pode-se observar a maior influência do *channel imbalance*, em relação a distorção do *cross-talk*, na resposta polarimétrica de dois refletores de canto triédricos instalados em cada uma das áreas de estudo consideradas no presente trabalho.

4 - Calibração Absoluta

A transformação das imagens em valores de σ^0 (dB) foi realizada segundo o método do pico de potência, Gray et al. (1990). O método do pico de potência é baseado na identificação do valor máximo da resposta da área efetiva da seção transversal do refletor de canto, utilizado como referência. O valor teórico da seção cruzada de um refletor de canto triédrico de referência, segundo Ulaby et al. (1981), é dado por:

$$\sigma_{cr} = \frac{4\pi A_{efR}^2}{\lambda^2} \quad (4.1)$$

onde $A_{efR} = l^2 / \sqrt{12}$ é a área efetiva do refletor de canto triédrico de lado l , e λ é o comprimento de onda utilizado pelo radar.

O fator de correção para σ^0 depende do ângulo de incidência, dado por:

$$f_c = \frac{\sigma_{cr}}{S_{pixel} A_{pico}} \text{sen } \theta_i = \frac{\sigma_{cr}}{\rho_r \rho_a A_{pico}} \text{sen } \theta_i \quad (4.2)$$

onde ρ_r e ρ_a representam o espaçamento dos *pixels* na direção radial e azimutal, respectivamente, A_{pico} é o valor da amplitude de pico do refletor, e θ_i é o valor do ângulo de incidência local do refletor.

A partir dos valores dos picos de amplitude dos refletores, gerou-se uma função da variação de amplitude pelo ângulo de incidência, ajustado por um polinômio do 1º grau, como mostrado na **Figura 5**, que serviu de referência para a geração das imagens calibradas em σ^0 , segundo a seguinte equação:

$$\sigma^0(i, j) = 20 \log_{10}[A(i, j) * f_c(i)] \quad (4.3)$$

onde $\sigma^0(i, j)$ é o valor do coeficiente de retroespalhamento em dB, $A(i, j)$ representa a amplitude da imagem no endereço (i, j) , $f_c(i)$ é o fator de correção para a coluna (i) da imagem, no sentido de alcance (radial).

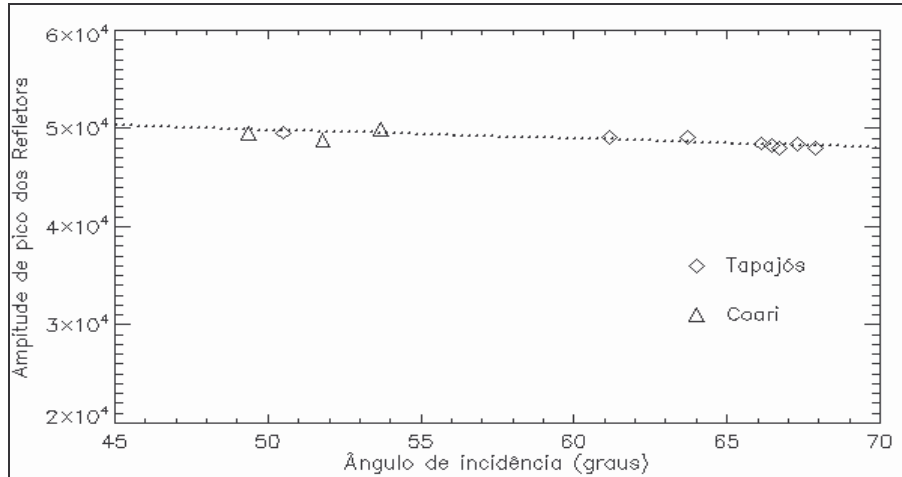


Figura 5 – Variação do pico de amplitude dos refletores em função do ângulo de incidência.

Na **Figura 6** são apresentados dois segmentos das imagens calibradas para σ^0 (dB) de Tapajós-PA e Coari-AM.

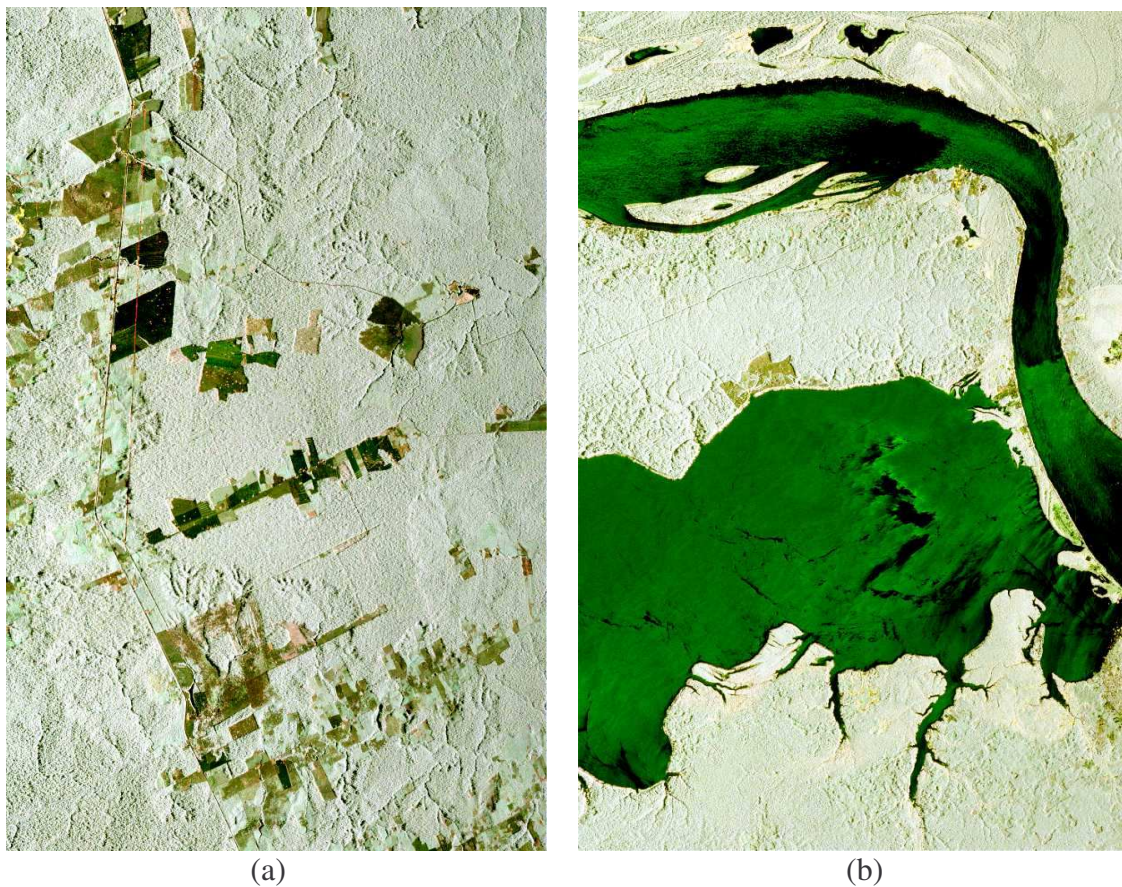


Figura 6 – Composição colorida (R-HH, G-VV, B-HV) das imagens polarimétricas em σ^0 (dB) de Tapajós-PA (a) e Coari-AM (b).

5 - Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia preliminar de calibração radiométrica das imagens PolSAR do sensor R99B do CENSIPAM, em banda L, adquiridas em duas áreas de estudo, uma na região de Coari-AM e outra nas proximidades da Floresta Nacional de Tapajós-PA.

Os dados das duas áreas de teste, Coari-AM e Tapajós-PA, foram adquiridos por sensores diferentes, apesar de serem idênticos na concepção. A diferença de sensores pode alterar as características dos dados polarimétricos, principalmente em relação aos valores de *cross-talk* e do *channel imbalance*. Entretanto os resultados obtidos no presente trabalho demonstram que o *channel imbalance* dos dois sensores ficaram bem próximos, conforme ilustrado na **Figura 4**. Além disso, observa-se que os valores estimados de *cross-talk* são da ordem de -30 dB, o que mostra que a maior influência da distorção é devido ao *channel imbalance*.

A metodologia de calibração empregada produziu resultados satisfatórios, pois os valores em σ^0 (dB) medidos em áreas de floresta tropical homogênea, nas polarizações HH, VV e HV, estão coerentes com os valores de outros sensores, conforme apresentados em Hoekman et al. (2000) e Santos et al. (1998).

6 - Agradecimentos

Os autores agradecem à colaboração da LBA-Santarém pela infra-estrutura, a PETROBRÁS pelo fornecimento dos refletores de canto, ao CENSIPAM pela aquisição das imagens com o sensor SAR R99B para a simulação do MAPSAR, e a Divisão de Geointeligência do IEAv do CTA pelo apoio técnico no processamento dos dados.

7 - Referências

- Gray, A. L.; Vachon, P. W., Livingstone, C. E.; Lukowski, T. L.; Synthetic Aperture Radar Calibration Using Reference Reflectors, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, no. 3, pp. 374-383, May 1990.
- Hoekman, D.; Quinones, M. J., Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in de colombian Amazon, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 2, pp. 685-696, March 2000.
- Quegan, S.; A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data—theory and observations, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 32, pp. 89-99, January 1994.
- Santos, J. R.; Lacruz, M. S. P., Keil, M.; Kux, H. J. H., Xaud, M., Análise de imagem do JERS-1 para a estimativa da biomassa de área de floresta tropical no sudoeste da Amazônia, IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, pp. 1517-1523, 1998.
- Van Zyl, J.; Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 28, pp. 337–348, May 1990.
- Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K.; Microwave Remote Sensing: Active and passive Microwave Remote Sensing fundamentals and radiometry, Norwood, MA, Artech House, 1981, V1.
- Zebker, H. A.; Lou, Y., Phase calibration of imaging radar polarimeter Stokes matrices, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, no. 2, pp. 246-252, March 1990.