

# Efeito da topografia na resposta polarimétrica de floresta tropical em imagens PALSAR/ALOS

## Effect of topography on the polarimetric response of tropical forest in PALSAR / ALOS images

Polyanna da Conceição Bispo<sup>1(\*)</sup>  
João Roberto dos Santos<sup>1</sup>  
Márcio de Morisson Valeriano<sup>1</sup>  
Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça<sup>2</sup>

### Resumo

A dependência do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) para diferentes alvos florestais não tem sido investigada quanto às variações topográficas, conforme se observa na literatura. Assim, o objetivo desse estudo é avaliar o efeito da topografia sobre o retroespalhamento derivado de áreas de floresta tropical em imagens PALSAR/ALOS (banda L). Para tal, foi realizada uma análise das respostas polarimétricas de áreas florestais, parcelas situadas em relevo plano, ondulado e fortemente ondulado. As respostas polarimétricas revelaram comportamento característico do efeito da topografia sobre o sinal do radar através da altura do pedestal, que indica a intensidade da despolarização da onda incidente. Observou-se uma maior frequência de ocorrência e de intensidade da despolarização nas parcelas de terrenos ondulados a forte ondulado, com acentuada despolarização como comportamentos típicos nesta última condição.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto; SAR; floresta tropical; resposta polarimétrica; topografia.

### Abstract

The dependence of backscatter coefficient ( $\sigma^\circ$ ) on different targets forest has not been deeply investigated as affected by topographic variations, as seen in the literature. The objective of this study is to evaluate the effect of topography on backscatter derived from rainforest areas in PALSAR / ALOS (L-band) images. An analysis

---

1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE; Endereço: Av. dos Astronautas, 1758, CEP: 12227-010, São José dos Campos, São Paulo, Brasil; E-mail: polyanna@dsr.inpe.br (\*) Autor para correspondência / roberto@dsr.inpe.br / valerian@dsr.inpe.br

2 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Departamento de Ecologia, Divisão de Bioecologia. Caixa-Postal: 478, Manaus, Amazonas, Brasil; E-mail: pmlag@inpa.gov.br

of the polarimetric responses of forest plots located in flat, gentle and undulated terrain was performed. The polarimetric responses showed a typical behavior of the topography effect on the radar signal through the height of the pedestal, which indicates the intensity of depolarization of the incident wave. There was a higher frequency of occurrence and intensity of depolarization in the plots on gentle and undulated terrains, with a marked depolarization as a typical pattern for the last condition.

**Key words:** Remote sensing; SAR; forestry; polarimetric responses; topography.

## Introdução

Com a disponibilidade de novas imagens SAR (Radar de Abertura Sintética), tem crescido o número de estudos que exploram este recurso para o inventário e monitoramento da vegetação, sobretudo em áreas tropicais, onde é constante um percentual de cobertura de nuvens que impedem regularmente a aquisição de dados ópticos. Embora os efeitos da topografia sobre a calibração de imagens SAR com relação ao espalhamento ( $\sigma^\circ$ ) e remoção do ganho do padrão da antena sejam conhecidos (VAN ZYL et al., 1993; LUCKMAN, 1998), a dependência do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) para diferentes alvos florestais considerando as variações topográficas não têm sido totalmente investigada, com a maioria destes estudos sendo realizados em áreas relativamente planas e horizontais (SANTOS et al., 2009).

Quando os dados SAR são adquiridos ao longo de um terreno ondulado, as variações do ângulo de incidência local e o ângulo de orientação devido à topografia local podem levar às mudanças no espalhamento do sinal (PARK; YAMAGUCHI, 2011), devido à despolarização da onda eletromagnética. O espalhamento double-bounce pelas ondas de radar nos troncos de árvores, seguido por um retroespalhamento do solo da floresta tornam-se informações afetadas por esses efeitos topográficos (VAN ZYL et al., 1993,

LUCKMAN; BAKER, 1995). Como este tipo de dispersão é muito sensível à orientação relativa das superfícies de espalhamento, considera-se que os resultados podem ser fortemente afetados pela topografia local. Por conseguinte, as alterações nos mecanismos de espalhamento, especialmente no termo de interação vegetação-solo, devem ser cuidadosamente levados em conta na análise do sinal de SAR quando há também relativa variação da amplitude topográfica no terreno. Diante disso, o objetivo desse estudo é avaliar o efeito da topografia sobre o retroespalhamento em imagens PALSAR para áreas de floresta tropical, a partir das respostas polarimétricas de parcelas representativas de diferentes feições de relevo: plano, ondulado e forte ondulado.

## Metodologia

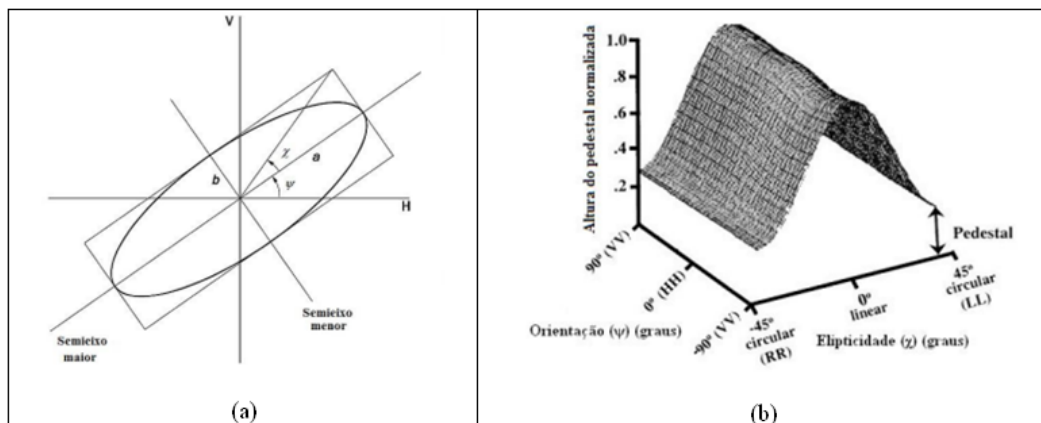
O presente estudo foi realizado na Floresta Nacional do Tapajós (FNT), entre as coordenadas de 2°42'24 0,0918" a 4°07'18 0,9438" S e de 54°52'37 0,2464" a 54° 57'38 0,9603" W. A FNT é uma unidade de conservação de aproximadamente 545.000 ha inserida no bioma Amazônia no oeste do estado do Pará, gerenciada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). O entorno da FNT é dominado por uma paisagem com uso e cobertura do solo caracterizada pela forte pressão antrópica, principalmente

pelo avanço da agricultura mecanizada e da pecuária extensiva. O clima da região é do tipo Ami (classificação de Köppen), com temperatura média anual de 25°C e precipitação média anual de 1.800 mm, apresentando maior concentração de chuvas entre os meses de janeiro e maio. A topografia local varia de plana (na porção norte da área) à forte ondulada (na porção sul da área). Os tipos de solos predominantes, na área, são o Latossolo Amarelo Distrófico e o Podzólico Vermelho Amarelo e a vegetação é classificada como Floresta Ombrófila Densa e Aberta (VELOSO et al., 1991).

Para verificar os efeitos da topografia no sinal de restroespalhamento de imagens PALSAR/ALOS foram geradas respostas polarimétricas de parcelas de floresta primária, distribuídas em três diferentes categorias de terreno (plano, ondulado e forte ondulado). No presente estudo foram utilizadas as imagens full polarimétricas, de banda L do PALSAR, com resolução nominal de 30 m, órbita ascendente e ângulo off-nadir de 21,5°.

É importante registrar que cada parcela de floresta tropical selecionada para obtenção da resposta polarimétrica foram devidamente georreferenciadas e inventariadas em trabalho de campo.

A resposta polarimétrica de um determinado alvo consiste na representação gráfica tridimensional da variação do retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) deste alvo em função dos ângulos da elipse de polarização, denominados ângulo de elipticidade ( $-45^\circ \leq \chi \leq 45^\circ$ ) e ângulo de orientação ( $-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ ). Os ângulos de elipticidade de  $0^\circ$  e  $\pm 45^\circ$ , por exemplo, representam as polarizações linear e circular, respectivamente (Figura 1a). Com  $\chi = 0$  os ângulos de orientação de  $0^\circ$  e  $90^\circ$  representam polarização horizontal e vertical (EVANS et al., 1988; SANTOS et al., 2009) (Figura 1b). Aliado a isso, a altura pedestal mínima, representada no gráfico da figura 1b, indica a parte da componente não polarizada do espalhamento, estando relacionada ao grau de polarização da onda espalhada (EVANS et al., 1988).



**Figura 1(a).** Elipse de polarização ilustrando os ângulos de orientação ( $\psi$ ) e orientação elipticidade ( $\chi$ )

Fonte: Adaptada de Van der Sanden (1997); (b) Representação tridimensional da resposta de polarização de um alvo teórico (refletor de canto triédrico). Fonte: Narvaes(2010), modificada de Van Zyl et al. (1987).

**Figure 1(a).** Polarization ellipse illustrating the orientation angle ( $\psi$ ) and ellipticity angle ( $\chi$ )

Source: Adapted from Van der Sanden (1997), (b) Three-dimensional representation of the polarization response of a theoretical target (trihedral corner reflector). Source: Narvaes (2010), modified from Van Zyl et al. (1987).

A forma da resposta polarimétrica representa os mecanismos de espalhamento dominantes refletindo características do alvo nas configurações polarizadas linear, circular ou elíptica, em todas as polarizações (MCNAIRN et al., 2002). De acordo com a natureza da transmissão e recepção da polarização, a resposta polarimétrica pode ser chamada co-polarizada, em que se tem mesma polarização tanto na transmissão como na recepção, ou cruzada quando ambas são ortogonais (VAN ZYL et al., 1987). Desse modo é possível visualizar a variação de  $\sigma^\circ$  (normalizado) para todas as combinações dos ângulos  $\psi$  e  $\chi$  tanto para a recepção como para a transmissão do vetor campo elétrico.

No presente estudo foi utilizada a resposta co-polarizada para separar contribuições de espalhamento com diferentes naturezas. A utilização dessa análise se baseou na abordagem de Van Zyl et al. (1987) e de Matthaes et al. (1991), os quais descrevem que as respostas co-polarizadas já fornecem informações de vários mecanismos de espalhamento (superficial, double bounce, e múltiplo/volumétrico), que combinam com o rendimento global do espalhamento de vários estados de polarização (linear, circular, e elíptico).

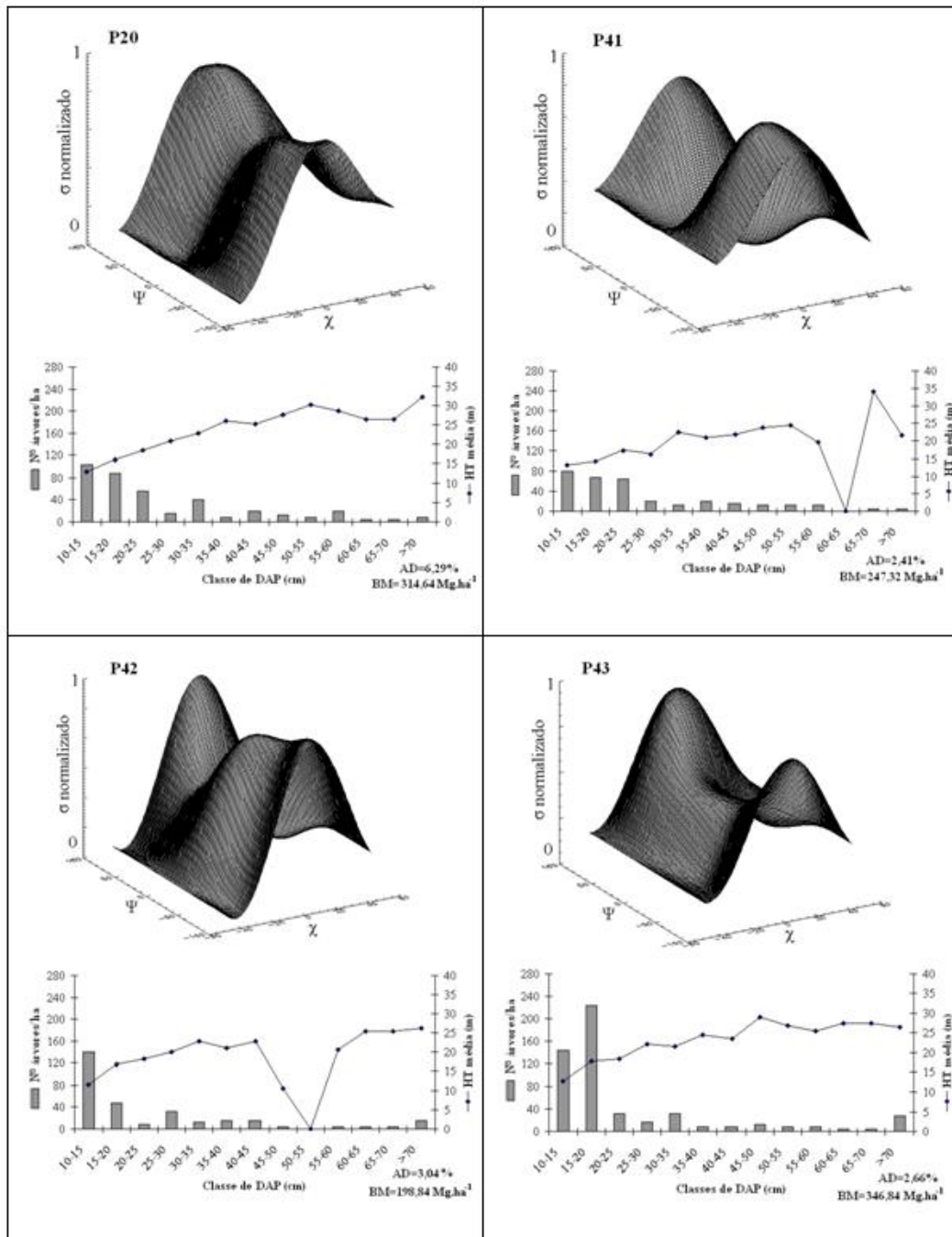
## Resultados e Discussão

A figura 2 mostra as respostas polarimétricas co-polarizadas e o comportamento da estrutura florestal, em 4 parcelas localizadas em cada um dos 3 diferentes tipos de terreno (plano, ondulado e forte ondulado). Apresentam-se o número de árvores e a altura total (HT) por intervalo de classe diamétrica, bem como os valores médios de abertura do dossel (AD) e de biomassa acima do solo por parcela (BM).

Tais informações estruturais foram utilizadas para auxiliar na interpretação das respostas polarimétricas. Apesar de não terem sido registradas diferenças estatísticas significativas entre os valores médios de altura total (HT) entre as parcelas, as distribuições diamétricas sugerem a ocorrência de certa variabilidade nos padrões estruturais. As parcelas designadas como P20, P41, P42 e P43 foram as que apresentaram estrutura mais desenvolvida, conseqüentemente com maior biomassa, e com localização em áreas planas.

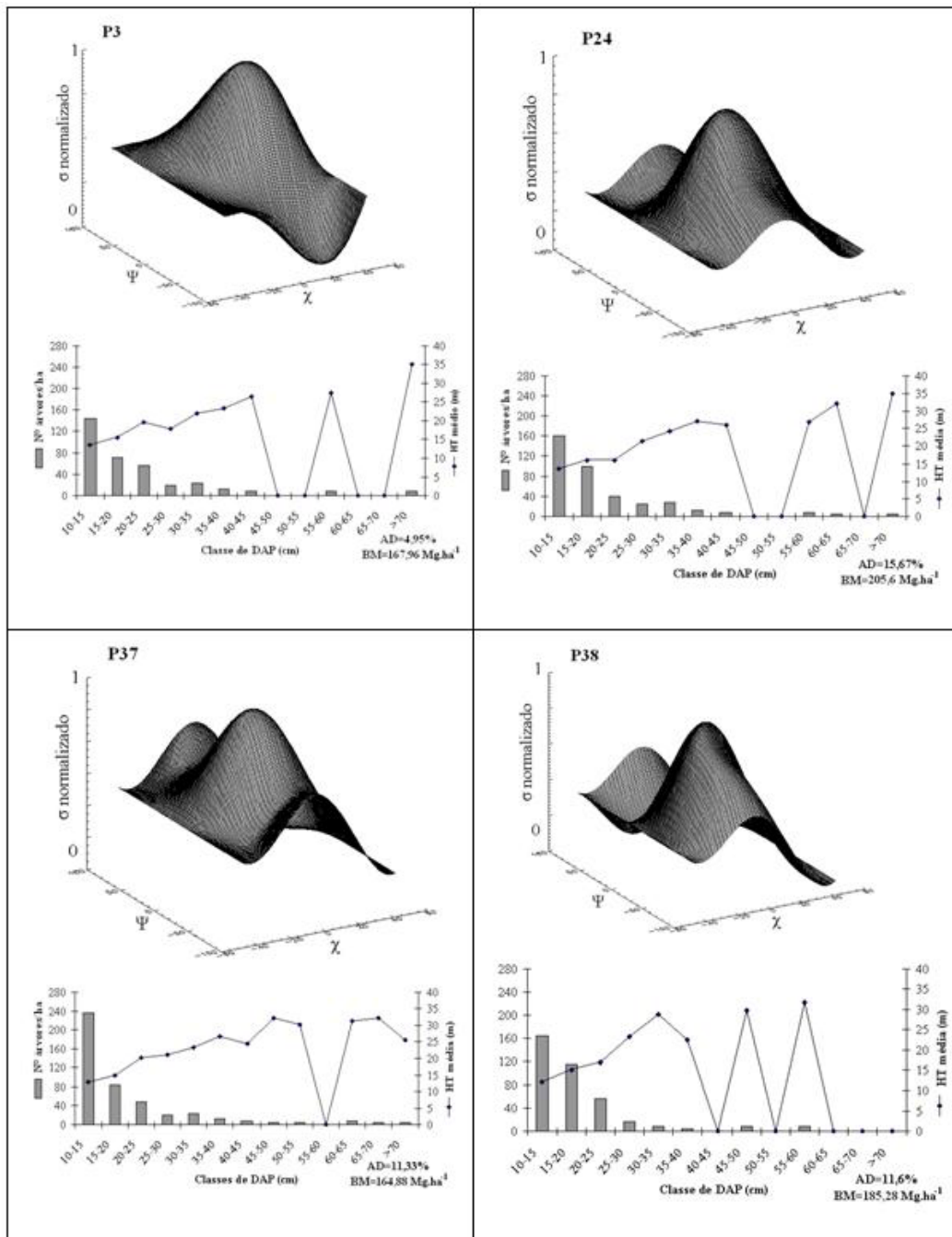
As configurações polarimétricas de determinado alvo não constituem “assinaturas” invariáveis, pois tais respostas dependem, além de uma série de fatores intrínsecos desses alvos, de fatores externos a ele interligados no processo de ocorrência geográfica e ambiental. Nas áreas florestais em terrenos planos (Figura 2 (a)) a maioria das parcelas se comportou com alta resposta na polarização VV (P20, P41, P42 e P43). Estas unidades florestais apresentaram os maiores valores de  $\sigma^\circ$  em polarizações lineares ( $\chi = 0^\circ$ ), com orientação preferencialmente vertical ( $\psi = \pm 90^\circ$ ). O formato desta resposta de polarização mostra uma forte similaridade com a resposta teórica de cilindros condutores finos e curtos (por exemplo, elementos espalhadores de menores dimensões do que o comprimento de onda). Aliado a isso tais parcelas possuem dossel mais fechado (em torno de 3% de AD) e maior valor de biomassa aérea, o que sugere que o espalhamento por pequenos galhos orientados verticalmente é uma importante contribuição para o retroespalhamento total desta unidade, conforme citado também em estudos de Gonçalves (2007).

Como síntese dessas observações, nas áreas planas não houve variações muito bruscas no que se refere à altura do pedestal das respostas polarimétricas. A altura do



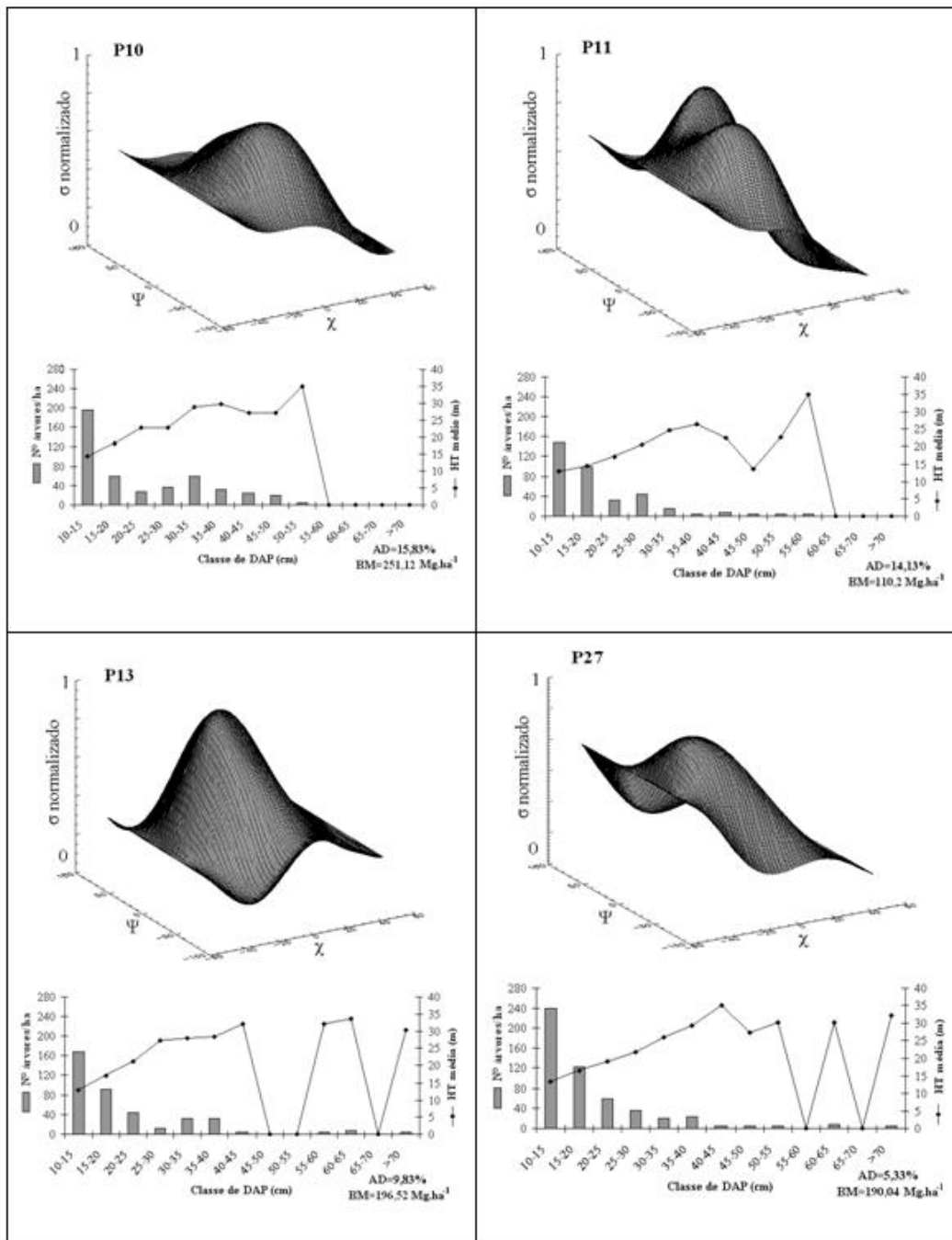
**Figura 2(a).** Resposta polarimétrica co-polarizada em banda L (ALOS/PALSAR) e comportamento estrutural da tipologia florestal, mostrando inclusive os valores biomassa para as parcelas localizadas em terreno plano na região do Tapajós

**Figure 2(a).** Co-polarized response of L-band (ALOS / PALSAR) and structural behavior of forest type, including biomass values of plots located on flat terrain in the Tapajós region



**Figura 2(b).** Resposta polarimétrica co-polarizada em banda L (ALOS/PALSAR) e comportamento estrutural da tipologia florestal, mostrando inclusive os valores biomassa para as parcelas localizadas em terreno ondulado na região do Tapajós

**Figure 2(b).** Co-polarized response of L-band (ALOS / PALSAR) and structural behavior of forest type, including biomass values of plots located on gentle terrain in the Tapajós region.



**Figura 2(c).** Resposta polarimétrica co-polarizada em banda L (ALOS/PALSAR) e comportamento estrutural da tipologia florestal, mostrando inclusive os valores biomassa para as parcelas localizadas em terreno forte ondulado na região do Tapajós

**Figure 2(c).** Co-polarized response of L-band (ALOS / PALSAR) and structural behavior of forest type, including biomass values of plots located on undulating terrain in the Tapajós region.

pedestal é definida pelo valor mínimo do gráfico da resposta polarimétrica (Figura 1b). Este valor define, na realidade, a proporção de radiação despolarizada, que Gonçalves (2007) associou em seus estudos SAR de banda L, também às variações de diversidade florística e estruturais, com influência na altura do pedestal. No caso do presente estudo, houve um comportamento característico de áreas de floresta com alta densidade de elementos que promovem espalhamento múltiplo e /ou de terrenos movimentados, como esperado.

No que se refere às amostras florestais de terrenos ondulados (Figura 2 (b)), as respostas de polarização das unidades P3, P24, P37 e P38 indicaram que os maiores valores de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) ocorreram em polarizações lineares ( $\chi = 0^\circ$ ), com orientação preferencialmente horizontal ( $\psi = 0^\circ$ ). Embora este comportamento sugira um efeito direto da topografia, através da distribuição dos ângulos de incidência na superfície do terreno (efeito cosseno), pode ser também devido a dosséis com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Esta resposta é similar àquelas apresentadas pela teoria para refletores de cantos triédricos, os quais possuem uma geometria de espalhamento do tipo double bounce, quando a entrada do refletor está alinhado com a direção da radiação eletromagnética, como mencionado em Zebker e Norikane (1987). Mantida esta hipótese, este comportamento pode se explicar pelo fato de estas amostras possuírem uma maior abertura do dossel, como corroboram os dados levantados (em torno de 11%). Apesar de haver uma contribuição do espalhamento proveniente de múltiplas interações dos elementos espalhadores com orientação preferencialmente horizontal,

o espalhamento do tipo double bounce (interação solo-tronco) se deve nesse caso às condições estruturais indicativas de um dossel mais aberto, considerado o mecanismo predominante (BISPO, 2012). Há de considerar também a maior altura do pedestal de certas amostras tais como P37, P38 e P24. De acordo com Zebker e Van Zyl (1991), isto sugere a ocorrência de uma variação considerável das propriedades de espalhamento em elementos de resolução adjacentes, ou seja, de um indicador da presença de um componente de espalhamento não polarizado (despolarização).

Finalmente, as respostas polarimétricas da floresta nos terrenos forte ondulados (Figura 2 (c)) representadas pelas parcelas P27, P11, P13 e P10 apresentaram comportamento similar entre si e indicam que os maiores valores de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) ocorrem em polarizações lineares ( $\chi = 0^\circ$ ), com orientação preferencialmente horizontal ( $\psi = 0^\circ$ ), conforme descrito por Zebker e Norikane (1987). Tais autores mencionam que o espalhamento se deve a múltiplas interações dos elementos espalhadores com orientação preferencialmente horizontal (dossel florestal homogêneo), conjuntamente com setores da cobertura florestal onde o espalhamento é do tipo double bounce (interação solo-tronco) oriundo da abertura do dossel (em média 13% nestas parcelas). Neste caso, é oportuno lembrar, como possível efeito sobre esta resposta, aquela decorrente da despolarização (identificada devido a altura do pedestal na resposta polarimétrica mais elevada), comum em terrenos movimentados. Aliado a isso, a considerável altura do pedestal encontrada para esses atuais casos, sugerem, segundo Zebker e Van Zyl (1991), a ocorrência de uma variação expressiva das propriedades



de espalhamento em elementos da imagem, ou seja, de um indicador da presença de um componente de espalhamento não polarizado, teoricamente. Esta mudança do estado de polarização conhecida como despolarização é causada principalmente pelo espalhamento múltiplo devido à rugosidade da superfície e à interação volumétrica com o alvo. Uma vez interagindo com o alvo, a onda eletromagnética incidente pode ser despolarizada e/ou repolarizada.

Os resultados apresentados na figura 2 (a, b e c) mostram que existem certas variações nas respostas polarimétricas entre as classes de relevo relacionadas a um conjunto de mecanismo de espalhamento, sobretudo volumétrico, predominante em floresta primária, bem como à despolarização provocada pela variação do relevo. Aliado a isso, estes resultados corroboram aqueles de RAUSTE (1991), que estudou dados SAR de banda P, de penetrabilidade na floresta próxima à da banda L, pelo qual conclui que o

efeito do relevo é forte e expressivo nos canais co-polarizados, em especial polarizações HH.

## Conclusões

As respostas polarimétricas revelaram comportamento característico do efeito da topografia sobre o sinal do radar através da altura do pedestal, que indica a intensidade da despolarização da onda incidente. Observou-se uma maior frequência de ocorrência e de intensidade da despolarização nas parcelas de terrenos ondulados a forte-ondulado, acentuada despolarização como comportamentos típicos nesta última condição.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelas bolsas de estudo e de produtividade em pesquisa, ao LBA e IBAMA pelo apoio logístico, e também ao PROCAD/CAPES (Projeto 108/2007).

## Referências

BISPO, P. C. **Efeitos de geomorfometria na caracterização florístico-estrutural da floresta tropical da região de Tapajós com dados SRTM e PALSAR**. 2012. 150f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

EVANS, D. L.; FARR, T. G.; VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A. Radar polarimetry: analysis tools and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26, n.6, p.774-789, 1988.

GONÇALVES, F. G. **Avaliação de Dados Polarimétricos para Estimativa Volumétrica de Florestas Tropicais**. 2007. 87f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

LUCKMAN, A. J.; BAKER, J. R. The contribution of trunk-ground interactions to the SAR backscatter from a coniferous forest. **Proceedings of IEEE (IGARSS)**, v.3, p.2032-2034, 1995.

LUCKMAN, A. J. Correction of SAR imagery for variation in pixel scattering area caused by topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, p.344-350, 1998.

MATTHAEIS, P.; FERRAZZOLI, P.; GUERRIERO, L.; SCHIAVON, G.; SOLIMINI, D.; TOGNOLATTI, P. Radar response to vegetation parameters: comparison between theory and MAESTRO-1 results. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. 1991, Espoo, Finland. **Proceedings...** [S.I.]: 1991. v.1, p.685-688.

MCNAIRN, H.; DUGUAY, C.; BRISCO, B.; PULTZ, T. Z. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. **Remote Sensing of Environment**, v.80, n.2, p.308-320, 2002.

NARVAES, I. **Avaliação de dados SAR polarimétricos para a estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais**. 2010. 167f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

PARK, S-E; YAMAGUCHI, Y. Topography Effects on Polarimetric Sar Remote Sensing of Mountainous Terrain. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. 2011. **Proceedings...** [S.I.]: 2011, p.4099-4102.

RAUSTE, Y. Polarimetric Radar signatures of forest as a function of terrain topography. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. 1991. **Proceedings...** [S.I.]: Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, International, 1991, p.341-344.

SANTOS, J. R.; NARVAES, I. S.; GRAÇA, P. M. L. A.; GONÇALVES, F. G. Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon. In: JEDLOVEC, G. (NASA/MSFC-USA) (Eds.). **Advances on geosciences and remote sensing**. 1 ed. Vukovar: In-Tech, 2009, v.8, p.183-206.

VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A.; ELACHI, C. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. **Radio Science**, v.22, n.4, p.529-543, 1987.

VAN ZYL, J. J. The effect of topography on radar scattering from vegetated areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, p.153-160, 1993.

VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. 1997. 330f. Doctoral Thesis – Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1997

VELOSO, R. B.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da Vegetação Brasileira, adaptada um Sistema Universal**. Rio de Janeiro: IBGE. 1991. 124p.

ZEBKER, H. A.; NORIKANE, L. Radar polarimeter measures orientation of calibration corner reflectors. **Proceedings of the IEEE**, v.75, n.12, p.1686-1688, 1987.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J. Imaging radar polarimetry: a review. **Proceedings of the IEEE**, v.79, n.11, p.1583-1606, 1991.