Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Análise de uso da terra e cobertura florestal na Amazônia central, a partir de dado polarimétrico PALSAR/ALOS-1 e coerência interferométrica TanDEM-X

Évelyn Márcia Pôssa¹, Fábio Furlan Gama², João Roberto dos Santos³, José Cláudio Mura⁴, Polyanna da Conceição Bispo⁵

¹Doutoranda em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte – MG. evelynpossa@yahoo.com (autora correspondente); ²4Tecnologistas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Av. dos Astronautas, 1758 - Jd. Granja, São José dos Campos – SP. fabio@dpi.inpe.br, mura@dpi.inpe.br; ³Pesquisador Titular do INPE. joao.roberto@inpe.br; ⁵ Pesquisadora associada da University of Leicester, Centre for Landscape and Climate Research, University Rd, Leicester LE1 7RH, Reino Unido. polybispo@gmail.com.

Artigo recebido em 04/01/2018 e aceito em 14/02/2018

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é verificar o potencial de atributos polarimétricos extraídos de imagens-radar PALSAR/ALOS conjugados ao atributo de coerência interferométrica dos dados TanDEM-X/TerraSAR-X para o mapeamento de uso da terra e tipos de cobertura florestal Amazônia brasileira. Na análise dessas imagens-radar uma série de atributos polarimétricos foi extraída a partir da informação de fase utilizando teoremas de decomposições de alvos formulados por Cloude-Pottier, Touzi, Freeman-Durden e Yamaguchi. Esse procedimento resultou em quatro grupos de atributos, os quais foram classificados individualmente e/ou associados à coerência interferométrica, através do algoritmo MAXVER-ICM. Empregando informações de campo, a validação temática foi realizada por matrizes de confusão, índice Kappa e exatidão global. No cenário investigado nove classes temáticas (floresta primária; solo em pousio ou solo preparado; sucessões secundárias avançada, intermediária e inicial; área cultivada; pasto sujo; pasto limpo; e corpo d'água) foram identificadas no processo de mapeamento deste ambiente tropical. Atributos polarimétricos derivados do teorema de decomposição de Cloude-Pottier ($H/\alpha/A$) associados ao atributo de coerência interferométrica (γ) mostraram melhor desempenho classificatório (Kappa = 0,72 e exatidão global = 78,79%) comparado aos demais.

Palavras-Chave: uso e cobertura da Terra, Amazônia, Sensoriamento Remoto, radar, decomposição de alvos, coerência interferométrica.

Land use and forest cover analysis in central Amazon, from PALSAR/ALOS polarimetric data and TANDEM-X interferometric coherence

ABSTRACT

The aim of this study is to verify the potential of polarimetric attributes extracted from PALSAR/ALOS-1 radar images combined to the interferometric coherence from TanDEM-X/TerraSAR-X data for land use and land cover mapping in the Brazilian Amazon. From the phase information in of these radar images, polarimetric attributes were extracted by target decomposition theorems formulated by Cloude-Pottier, Touzi, Freeman-Durden and Yamaguchi. This procedure resulted in four groups of attributes, which were classified individually and/or associated with interferometric coherence descriptors through the MAXVER-ICM algorithm. Using field information the method was validated based on the confusion matrix, Kappa and overall accuracy. A total of nine thematic classes were identified in the mapping process of this tropical environment: primary forest; advanced, intermediate and initial secondary succession; bare soil; agricultural area; two classes of pasture and water body. Derived attributes from Cloude-Pottier decomposition theorem ($H/\alpha/A$) associated with interferometric coherence attribute (γ) showed the best classification performance (Kappa = 0.72 and an overall accuracy = 78.79%) compared to the other methods.

Keywords: land use and land cover; Amazon. Remote Sensing; SAR; Target decomposition; interferometric coherence

Introdução

A contribuição apresentada pelo Brasil às Nações Unidas (*Intended Nationally Determined Contribution* - iNDC) sobre a mudança do clima na Conferência de Paris em 2015 (COP-21), afixou como um dos compromissos minimizar o percentual de emissões de gases do efeito estufa provenientes do desflorestamento ilegal da Amazônia brasileira, por meio do fortalecimento de políticas públicas e medidas de controle (Brasil, 2015). Além da importância na dinâmica climática, ecossistemas florestais como a Amazônia abrigam alta biodiversidade e desempenham papel significativo nos ciclos hidrológico e biogeoquímicos. Porém, estudos do Instituto Brasileiro de Economia Aplicada apontam um cenário incompatível com a importância funcional deste tipo de ecossistema e associa a intensificação do desflorestamento amazônico ao crescimento desordenado da produção de grãos e bovinos, fato que projeta a região como a principal frente de expansão das atividades agropecuárias brasileiras (Ipea, 2013).

Sensores remotos em plataformas orbitais e sub-orbitais vem sendo empregados em sistemas de monitoramento e detecção de mudanças da cobertura da terra, por possibilitarem uma aquisição sistemática e sinóptica de dados (Babamaaji et al., 2014; Santos et al., 2014; Silva et al., 2014; Reis et al., 2018). No plano operacional, tradicionalmente o monitoramento do desflorestamento amazônico é realizado por sensores remotos ópticos. Entretanto, a periódica concentração de nuvens em determinadas zonas da região compromete a coleta de dados. Sensores que operam na faixa das microondas ($1\text{mm} \leq \lambda \leq 1\text{m}$) do espectro eletromagnético, denominados sensores radar (sigla no inglês Radio Detection and Ranging), representam uma alternativa devido à baixa sensibilidade à nebulosidade (Sinha et al., 2015a; Otukey et al., 2015). Este tipo de sistema sensor fornece informações sobre a geometria e propriedade dielétrica dos alvos terrestres, o que permite identificar tipologias de uso e cobertura da terra (Hagensieker e Waske, 2018), compartimentar a paisagem florestal (Carreiras et al., 2017), diagnosticar seu possível estado de degradação (Martins et al., 2016; Delgado-Aguilar et al., 2017), quantificar a biomassa acima do solo (Minh et al., 2016; Yu e Saatchi, 2016; Treuhaft et al., 2017), entre outras aplicações.

O aumento da pressão antrópica sobre as paisagens tropicais e a crescente disponibilidade de dados de Radar de Abertura Sintética (SAR, sigla no inglês *Synthetic Aperture Radar*) têm motivado o desenvolvimento de novas metodologias para o

tratamento da informação adquirida, para elevar a precisão do processo de identificação dos processos antrópicos de mudanças da paisagem (Pereira et al., 2016). Neste estudo, esteve sob investigação um dado SAR polarimétrico obtido pelo sensor *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) em banda L, a bordo do *Advanced Land Observing Satellite-1* (ALOS-1) da Agência Espacial Japonesa - JAXA e um dado de coerência interferométrica gerado a partir de imagens SAR em banda X, adquiridas pela missão *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements* (TanDEM-X) composta pelos satélites TerraSAR-X (TSX-1) e TanDEM-X (TDX-1) do Centro Aeroespacial Alemão (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* - DLR). Estes dados foram investigados com o objetivo de avaliar o potencial dos atributos polarimétricos, extraídos de dado PALSAR, integrados ao atributo de coerência interferométrica da missão TanDEM-X, para o mapeamento dos tipos de uso da terra e cobertura florestal em uma região de expansão de fronteira agropecuária, situada no baixo Tapajós, a oeste do estado do Pará - Amazônia central.

A seção seguinte apresenta alguns princípios do imageamento por sensores SAR e alguns tipos de informação que podem ser extraídas dos produtos destes sensores.

Síntese conceitual SAR: técnicas de decomposição de alvos e coerência interferométrica

O sinal emitido pelo radar é retroespalhado ao interagir com a superfície. Este retroespalhamento depende dos atributos relativos ao sistema sensor (comprimento de onda (λ), ângulo de incidência (θ_i) polarização) e daqueles relacionados à superfície iluminada (topografia, rugosidade, ângulo de incidência local (θ_{loc}) e umidade dos espalhadores) (Ulaby et al., 1981; Lee e Pottier, 2009). O processamento do sinal de retorno de um sistema SAR convencional permite a geração de uma matriz de pixels, que informa sobre brilho e textura do terreno, a partir dos sinais-eco de cada espalhador contido dentro de um elemento de resolução radar (Lee e Pottier, 2009). Em um ambiente florestal, o parâmetro de imageamento SAR de maior influência no tipo de interação é o comprimento de onda, tendo como fontes de espalhamento elementos da vegetação com tamanhos proporcionais ao comprimento de onda: as bandas X ($\lambda \sim 3\text{cm}$) e C ($\lambda \sim 5,6\text{ cm}$) interagem com elementos do topo do dossel (folhas e pequenos galhos), possuindo menor penetração em formações florestais densas; as bandas L

($\lambda \sim 23\text{cm}$) e P ($\lambda \sim 72\text{cm}$) apresentam maior penetração em florestas e por isso sofre múltiplos espalhamentos. Destaca-se que além do comprimento de onda, o grau de penetrabilidade da onda depende do ângulo de incidência, polarização e das características do meio, como a umidade.

Sistemas SAR polarimétricos podem registrar, além do brilho e textura, a informação de fase, que viabiliza a análise dos tipos de mecanismos de espalhamento contidos na cena, permitindo análises mais quantitativas dos alvos em estudo. Existem diversos mecanismos pelos quais a energia pode ser retroespalhada, sendo os mais comuns: o espalhamento superficial, quando ocorre ainda na superfície do alvo (ex.: solo exposto, corpo d'água, pastagem); o espalhamento volumétrico, produzido por uma infinidade de elementos de dispersão cilíndricos aleatoriamente orientados (ex.: dosséis florestais); e do tipo *double-bounce*, quando há uma superfície vertical adjacente a um plano horizontal, orientados diretamente para a frente de onda do radar (ex.: solo *versus* tronco), cujos atributos foram

investigados por Liesenberg et al. (2016) e Martins et al. (2016), em análises de sensibilidade para categorizações das condições florestais.

A informação polarimétrica pode ser descrita por meio de matrizes (ex.: matriz de espalhamento [S], covariância [C] e coerência [T]) que viabilizam a análise da relação entre o vetor do campo elétrico emitido e o vetor espalhado e, por conseguinte, a informação sobre o espalhador (Lee e Pottier, 2009). As informações sobre o processo de espalhamento podem ser extraídas por meio de técnicas polarimétricas, como a decomposição de alvos, que facilita a interpretação de imagens polarimétricas SAR no processo de classificação, pois possibilita separar mecanismos de espalhamento de diferentes naturezas (Bispo et al., 2014; Varghese et al., 2016). Vários são os teoremas de decomposição de alvos, dentre os quais citam-se os de Cloude-Pottier, Freeman-Durden, Yamaguchi e de Touzi utilizadas neste estudo, cujos atributos e uma breve descrição destes encontram-se citados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos gerados a partir das decomposições de alvos de Cloude-Pottier, Freeman-Durden, Yamaguchi e Touzi a partir de dados SAR polarimétricos.

Atributo Extraído	Símbolo	Descrição	Fonte
Ângulo alfa	α	Indica o tipo de mecanismo de espalhamento dominante, isto é, se é volumétrico, superficial ou <i>double-bounce</i>	Cloude-Pottier (1996)
Entropia	H	Indica o número de mecanismos de espalhamento dominantes	
Anisotropia	A	Mede a importância relativa do segundo e terceiro tipos de espalhadores, revelando se há alguma direção preferencial de espalhamento	
Espalhamento Volumétrico	P_v	Modelado por uma nuvem de dispersores cilíndricos e finos aleatoriamente distribuídos, quantifica o espalhamento do tipo volumétrico da cena (ex.: dosséis florestais)	Freeman-Durden (1998)
Espalhamento <i>double-bounce</i>	P_d	Modelado a partir de duas superfícies ortogonais, quantifica o espalhamento <i>double-bounce</i> contido na cena. (ex.: solo <i>versus</i> tronco, solo <i>versus</i> edificação)	
Espalhamento Superficial	P_s	Indica a parcela do espalhamento superficial (ex.: solo exposto, solo arado)	
Espalhamento Volumétrico	Y_v	Nuvem de espalhadores cilíndricos e muitos finos aleatoriamente distribuídos. Quantifica o espalhamento do tipo volumétrico da cena	Yamaguchi et al. (2005)
Espalhamento <i>double-bounce</i>	Y_d	Modelado por duas superfícies ortogonais. Quantifica o espalhamento do tipo <i>double-bounce</i> da cena	

Espalhamento Superficial	Y_s	Indica a parcela do espalhamento superficial contido na cena.	Touzi (2007)
Espalhamento do tipo hélice	Y_H	Modela o espalhamento em forma de hélice	
Magnitude do tipo de espalhamento	α_{sn}	Ângulo da direção do vetor de espalhamento simétrico em base triedral-diedral	
Fase do tipo de espalhamento	Φ_n	Diferença de fase entre espalhamentos a partir de triedro e diedro	
Helicidade	τ_n	Indica a simetria do espalhamento do alvo	
Ângulo de orientação	Ψ_n	Medida intrínseca do ângulo de orientação	

Outro campo de aplicação de dados radar é a interferometria. A comparação entre as diferenças de fase de duas imagens de uma mesma região, obtidas a partir de antenas com ligeira diferença de geometria, torna possível encontrar as localizações dos pixels em três dimensões. Por meio destes dados também pode-se gerar imagens de coerência interferométrica (γ), muito úteis para fins de classificação (Olesk et al., 2016). A coerência ou o grau de correlação é uma medida da correlação da informação complexa correspondente ao sinal de duas imagens e_n e e_m complexas e é descrita pela Equação 1:

$$\gamma = \frac{|(e_1 e_2^*)|}{\sqrt{(|e_1|^2)(|e_2|^2)}} \quad (1)$$

em que $\langle \dots \rangle$ refere-se a uma média espacial de pixels, $*$ ao complexo conjugado, e_1 e e_2 referem-se aos pixels complexos das imagens que formam o par interferométrico.

Cada pixel de uma imagem de coerência representa a informação do módulo do coeficiente de correlação complexa de um par interferométrico. Este tipo de produto pode contribuir para a estratificação temática da paisagem, considerando que regiões florestadas apresentam baixa coerência interferométrica, em razão da instabilidade dos componentes florestais quando comparados a outras tipologias de uso e

cobertura da terra, como, pastagem, solo exposto e regiões de vegetação esparsa (Olesk et al., 2016). Devido à descorrelação volumétrica provocada pelos espalhadores florestais, a coerência interferométrica também é utilizada para inferir a estrutura da cobertura florestal e estimar a biomassa (Sinha et al., 2015b).

Área de estudo

A área está localizada entre as coordenadas UTM 721213 mE - 9665507 mN e 727742 mE - 9642508 mN, zona 21M, na Amazônia Central, a oeste do estado do Pará ao longo de um trecho da rodovia BR-163 Santarém-Cuiabá na região do baixo Tapajós (Figura 1). A área abrange uma pequena porção da Floresta Nacional do Tapajós (Flona do Tapajós) a oeste. No centro, situa-se a comunidade de São Jorge com pequenas propriedades rurais e a leste há propriedades rurais de grande porte (Rozon et al., 2015). A região fez parte do projeto de integração territorial do governo brasileiro na década de 1970 (Brasil, 1970), período no qual a vegetação natural - floresta ombrófila densa e aberta - passa a ser incisivamente alterada por atividades antrópicas, sobretudo, a partir da abertura da rodovia BR-163 que deu suporte aos diferentes agentes modificadores da paisagem.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo

A paisagem atual é formada por floresta nativa classificada como Floresta Ombrófila Densa e Aberta, com variações tipológicas em função do relevo. Também apresenta fragmentos de sucessões secundárias e coberturas associadas à produção rural familiar e à agropecuária ligada ao agronegócio. O clima é do tipo Am (classificação de Köppen), com temperatura média anual de 25 °C, precipitação média anual em torno de 2100 mm e estação chuvosa de dezembro a maio.

Material e métodos

Dados utilizados

Para este estudo foram utilizados: (i) imagem polarimétrica do sensor PALSAR/ALOS-1; (ii) imagem de coerência interferométrica gerada a partir dos dados dos satélites TSX-1/TDX1 da missão TanDEM-X; (iii) Modelo Digital de Elevação - MDE, adquirido pela *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM, utilizado como informação auxiliar ao processo de ortorretificação das imagens SAR; e (iv) dados de campo. O dado PALSAR foi obtido no modo *Polarimetric* - PLR (HH+HV+VV+VH - PLR) e possui um nível de processamento 1.1, que se refere a um dado complexo em *Slant range*, com compressão em alcance e 1 *look* em azimuth. Parâmetros das

imagens PALSAR, TSX-1 e TDX-1 estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Características das imagens PALSAR e TSX-1/TDX1

Atributos	PALSAR	TSX-1/TDX1
Data da Aquisição	19/03/2011	18/07/2011
Órbita	Ascendente	Descendente
Comprimento de onda (cm)	~23,6	~3
Ângulo de incidência	23,98	40.5
Resolução Radiométrica	16 bits	16 bits
Resolução Espacial (m)	9,36 x 3,58	6,59 x 1,08

A imagem de coerência interferométrica foi gerada empregando o software Sarscape 5.0, a partir dos produtos do imageamento *single-pass* dos satélites TSX-1 e TDX-1, livres de efeitos atmosféricos e decorrelação temporal. As etapas para geração da coerência interferométrica foram: (i) Registro em nível de subpixel das imagens TSX-1 e TDX-1; (ii) filtragem das imagens utilizando o filtro *Goldstein* com tamanho de janela de 5 x 5 pixels, que permitiu a estimação do coeficiente de correlação complexa; e (iii) ortorretificação nominal do resultado, método que considera parâmetros orbitais (posições e velocidades da plataforma), atributos processados (*doppler*, intervalo de atraso, espaçamento de pixel, etc.) e um Modelo Digital de Elevação - MDE/SRTM. Na imagem de coerência interferométrica pixels mais claros estão associados a maiores valores de coerência e pixels com valores tendendo a zero (pixels mais escuros) representam regiões de baixa coerência. A imagem de coerência interferométrica resultante possui um *look* em azimuth, três *looks* em *range* e dimensões de pixel de 12,5 metros.

Etapas de campo foram realizadas na área de estudo em agosto de 2012 e em setembro de 2014 em que pontos de verdade de campo foram registrados por meio de Sistema de Posicionamento Global (GPS). Classes de uso da terra apresentando mesmo estado de cobertura ou estado semelhante foram agrupadas em nove classes principais, sendo elas(a) FP: floresta primária, floresta manejada e floresta com baixa perda de densidade por corte indiscriminado e/ou queimada; (b) SSA: sucessão secundária avançada (idade > 15 anos); (c) SSInt: sucessão secundária intermediária (idade 5 a 15 anos); (d) SSI: sucessão secundária inicial (idade < 5 anos); (e) AC: área agrícola com cultivos em pleno desenvolvimento; (f) SP: áreas de solo preparado para plantio, incluindo nessa categoria as áreas em pousio e aquelas recém-colhidas; (g) PL: Pasto limpo; (h) PS: Pasto sujo, apresentando

espécies invasoras arbustivas, com ou sem a presença de babaçu (*Orbignya phalerata*) e/ou inajá (*Attalea maripa*); (i) CA: corpos d'água. Considerando que houve um intervalo de tempo entre as aquisições dos dados pelos sensores remotos e os levantamentos de campo, uma aferição temporal da concordância entre os pontos coletados e o estado da paisagem registrado pelos SAR foi necessária. Esta avaliação foi feita por fotointerpretação, a partir da sobreposição dos pontos coletados com um dado óptico adquirido pela constelação de satélites RapidEye, em junho de 2011.

Processamento das imagens SAR

O processamento das imagens PALSAR incluiu três fases principais: pré-processamento, classificação e validação (Figura 2). Inicialmente a partir das imagens PALSAR - PLR em formato *Single Look Complex* foram calculados os elementos da matriz de espalhamento [S]. Para o cálculo das matrizes de covariância [C] e coerência [T], a partir da matriz [S], foi necessária a aplicação de uma média espacial, processo denominado *Multilook* (Lee e Pottier, 2009), em que foi utilizada uma janela de média 7x1 para conversão do espaçamento do pixel de 3,59 x 9,37m (azimute x *range*) para 25,12 x 23,04 metros (azimute x *ground range*), considerando o ângulo de incidência de 23,98°. Para o tratamento efetivo do efeito *speckle*, as matrizes [C] e [T] foram filtradas utilizando o filtro *Refined Lee*, com uma janela de 5x5. O *speckle* é um efeito multiplicativo e surge em razão da natureza coerente das ondas utilizadas no processo de aquisição, que ao interagirem com os diversos alvos independentes no terreno, podem sofrer interferências construtivas ou destrutivas, causando bruscas variações nos níveis de cinza da cena.

Figura 2. Fluxograma do processamento dos dados SAR.

A partir das matrizes filtradas [C] e [T], foram calculadas as decomposições polarimétricas de Cloude-Pottier, de Freeman-Durden, de Touzi e de Yamaguchi, resultando em quatro grupos de atributos. A última etapa do processamento SAR consistiu na correção geométrica dos atributos por meio da geocodificação e ortorretificação. Para tanto, utilizou-se o mesmo MDE e método utilizados no processamento da imagem coerência, gerando uma imagem com pixels de 12,5 metros. A partir disso, realizou-se uma aferição da correspondência geométrica entre os atributos

extraídos dos dados PALSAR e da imagem coerência. A integração entre os dados PALSAR e coerência interferométrica TSX/TDX foi feita no ambiente do classificador, por meio de empilhamento de bandas.

A seleção de amostras representativas de cada classe temática foi feita utilizando-se pontos de amostragem levantados em campo. Parte do conjunto amostral destinou-se ao treinamento do algoritmo de classificação, enquanto outro conjunto de amostras foi destinado à validação do mapeamento, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3. Número de pixels para cada classe

Treinamento	Classes	Número de pixels	Validação	Classes	Número de pixels
	AC	1069		AC	106
	CA	461		CA	138
	FP	1080		FP	632
	PL	1005		PL	109
	PS	1037		PS	158
	SSA	661		SSA	104
	SSInt	633		SSInt	95
	SSI	315		SSI	58
	SP	1086		SP	85

CA = Corpo d'água; FP = Floresta Primária (com e sem exploração madeireira de baixo impacto); SSA = Sucessão Secundária Avançada; SSInt = Sucessão Secundária Intermediária; SSI = Sucessão Secundária Inicial; PS = Pasto sujo (com ou sem presença de babaçu - *Orbignya phalerata* e/ou inajá - *Attalea maripa*); PL = Pasto Limpo; AC = Área Cultivada; SP: solo em pousio ou solo preparado.

Para a etapa de classificação, foi utilizado o algoritmo MAXVER-ICM, implementado no Classificador Polarimétrico 7. A classificação máxima verossimilhança (MAXVER) é um método supervisionado pixel a pixel que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando atributos estatísticos. Para adequar o desempenho do classificador MAXVER ao tratamento de dados SAR, incorporou-se a informação contextual, que considera a dependência espacial na classificação por meio da integração ao algoritmo Iterated Conditional Modes – ICM (Freitas et al., 2007). Os atributos foram organizados em quatro grupos, sendo eles: Grupo Cloude-Pottier (GCP); Grupo Freeman-Durden (GFD); Grupo Touzi (GTz); e Grupo Yamaguchi (GYm). Cada grupo foi classificado individual e combinado à coerência interferométrica (γ) a fim de avaliar a contribuição desta informação, em banda X, para a informação polarimétrica, em banda L. Os resultados das classificações foram avaliados pela análise da matriz de confusão, pelo o coeficiente *kappa* e exatidão global, baseando no conjunto amostral de referência para validação (Lu et al., 2012). O teste

estatístico Z foi calculado para indicar a diferença estatística entre as classificações a 95% de confiança.

Resultados e análises

Integração dos atributos polarimétricos à coerência interferométrica

Os valores de *Kappa* e a exatidão global das classificações pelo método MAXVER-ICM dos grupos de atributos estudados estão explícitos na Tabela 4. A contribuição da informação de coerência interferométrica foi estatisticamente significativa para os grupos GTz e GYm, acrescentando a exatidão global a 12,2% e 4,4% respectivamente. Observa-se na Tabela 4 que o grupo GTz integrado à coerência interferométrica melhorou o desempenho classificatório das classes FP, PL, SP e SSInt, com destaque para esta última classe que passou de 4,24% para 64,21% de acerto. O grupo GYm apresentou melhora na discriminação das classes CA, FP, SSA, SSI, PL, AC e SP quando integrado a coerência interferométrica.

Tabela 4. Valores de *kappa* e da exatidão global das classificações.

Grupo de atributos	<i>kappa</i> ($\hat{k}$)	Var ($\hat{k}$)	Exatidão global (%)
GCP	0,70	1,87E-04	77,37
GCP+γ	0,72	1,43E-04	78,79
GFD	0,54	2,26E-04	62,19
GFD+ γ	0,57	2,17E-04	64,76
GTz	0,34	2,23E-04	41,93
GTz+ γ	0,46	2,17E-04	54,13
GYm	0,53	2,09E-04	61,04
GYm+ γ	0,57	2,00E-04	65,44

GCP = grupo de Cloude-Pottier; GFD = grupo de Freeman-Durden; GTz = grupo de Touzi; GYm = grupo de Yamaguchi; GSn = grupo dos coeficientes de Retroespalhamento; GPp = grupo dos índices de Pope; GSb = subconjunto ótimo; γ = Coerência Interferométrica.

O melhor desempenho classificatório foi exibido pelo grupo de atributos GCP integrado à coerência ($\hat{k} = 0,72$ e exatidão global = 78,79%). Contudo, o valor de *kappa* do grupo GCP integrado à coerência (GCP+ γ) não foi estatisticamente superior ao valor de *kappa* antes da integração. Contudo, em uma análise pormenorizada, o atributo coerência interferométrica quando

integrado ao grupo GCP contribuiu para a elevação do desempenho classificatório das classes investigadas, exceto a classe FP que apresentou uma diminuição de 13% de amostras corretamente classificadas, conforme apresenta a Tabela 5. Destaca-se o aumento do acerto na classificação das amostras da classe CA, que passou de 25,96% para 92,31% com a integração da coerência interferométrica.

Tabela 5. Porcentagem de acertos de cada classe temática em cada grupo de atributos.

	CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
GCP	58,70	91,81	25,96	30,53	12,07	86,08	90,83	92,45	91,76
GCP+ γ	69,57	79,61	92,31	31,58	31,03	84,81	93,58	93,40	92,94
GFD	78,26	53,29	40,38	45,26	56,90	37,97	93,58	95,28	87,06
GFD+ γ	78,99	58,59	42,31	47,37	56,90	37,97	100	100	100
GTz	81,88	19,90	25,96	12,63	3,45	79,11	64,22	94,34	47,06
GTz+ γ	57,25	46,23	67,31	4,21	34,48	79,11	63,30	100	44,71
GYm	62,32	64,37	47,12	64,21	29,31	0,00	89,91	87,74	94,12
GYm+ γ	73,91	72,07	52,88	55,79	32,76	0,00	99,08	89,62	100

CA = Corpo d'água; FP = Floresta Primária (com e sem exploração madeireira de baixo impacto); SSA = Sucessão Secundária Avançada; SSInt = Sucessão Secundária Intermediária; SSI = Sucessão Secundária Inicial; PS = Pasto sujo (com ou sem presença de babaçu - *Orbignya phalerata* e/ou inajá - *Attalea maripa*); PL = Pasto Limpo; AC = Área Cultivada; SP: solo em pousio ou solo preparado.

Na Tabela 6, observa-se que classe FP teve 18,62% de amostras classificadas como SSA, a classe SSInt teve ~51% classificadas como SSA e 68,97% das amostras de SSI foram classificadas como SSInt. Isso pode estar relacionado à proximidade entre as idades dessas regenerações,

no processo de cronossequência, impondo uma tênue distinção fisionômico-estrutural entre elas para a banda L. Importante destacar que na área de estudo alguns fragmentos de sucessão secundária avançada tem cerca de 30 anos, apresentando uma configuração fisionômico-estrutural similar à floresta primária em banda L.

Tabela 6. Matriz de confusão dos atributos da Decomposição de Cloude-Pottier integrados à Coerência Interferométrica

	CA	FP	SSA	SSInt	SSI	PS	PL	AC	SP
CA	69,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FP	0,00	79,61	7,69	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SSA	0,00	18,62	92,31	51,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SSInt	0,00	1,77	0,00	31,58	68,97	0,00	0,00	0,00	0,00
SSI	0,00	0,00	0,00	1,05	31,03	0,00	0,00	0,00	0,00
PS	0,00	0,00	0,00	5,26	0,00	84,81	6,42	1,89	0,00
PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,19	93,58	4,72	7,06
AC	27,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	93,40	0,00
SP	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,94

CA = Corpo d'água; FP = Floresta Primária (com e sem exploração madeireira de baixo impacto); SSA = Sucessão Secundária Avançada; SSInt = Sucessão Secundária Intermediária; SSI = Sucessão Secundária Inicial; PS = Pasto sujo (com ou sem presença de babaçu - *Orbignya phalerata* e/ou inajá - *Attalea maripa*); PL = Pasto Limpo; AC = Área Cultivada; SP: solo em pousio ou solo preparado.

Apesar de ser esperada certa similaridade no comportamento radiométrico (relacionado ao espalhamento superficial) entre as classes SP, PL e PS na banda L, o Grupo GCP demonstrou capacidade de discriminar estas três classes. O atributo anisotropia (A) contribui para a discriminação da classe SP, pois a diferencia das demais classes (PL e PS) por indicar regiões com direção de espalhamento preferencial, como regiões de terreno arado.

Análise de uso e cobertura da terra

O resultado do mapeamento de uso e cobertura da terra resultante da integração do grupo GCP e da coerência interferométrica está apresentado na Figura 3, enquanto os percentuais das áreas ocupadas por cada classe são apresentados na Figura 4.

Figura 3. Mapa de Uso e Cobertura da região da Flona do Tapajós e adjacências gerado a partir da classificação do grupo de atributos de Cloude-Pottier associado à coerência. CA = Corpo d'Água; FP = Floresta Primária (com e sem exploração madeireira de baixo impacto); SSA = Sucessão Secundária Avançada; SSInt = Sucessão Secundária Intermediária; SSI = Sucessão Secundária Inicial; PS = Pasto sujo (com ou sem presença de babaçu - *Orbignya phalerata* e/ou inajá - *Attalea maripa*); PL = Pasto Limpo; AC = Área Cultivada; SP = solo em pousio ou solo preparado.

A partir da década de 1970, dentro das diretrizes governamentais de estabelecimento de planos de ocupação dos eixos rodoviários, houve a derrubada da floresta e a implantação de extensas áreas de pastagem ao longo da BR-163, bem como o assentamento de colonos em pequenas propriedades. Este processo histórico de ocupação

explica parte do quadro atual de uso da terra da área estudada (Figura 3). A parte central da área sob investigação, onde se situa a vila de São Jorge (Figura 3), constitui um mosaico de usos que expressam o sistema de produção familiar vigente, realizado em pequenas propriedades. A pastagem (PL e PS) foi o padrão de uso mais comum

identificado em campo e rotulado pela classificação, ocupando 8,58% da área sob investigação, o que indica a importância do segmento pecuário no cenário produtivo local (Figura 4). Com relação à atividade agrícola, indicada pelas classes SP e AC, atualmente prevalecem na localidade de São Jorge cultivos para fins de subsistência, normalmente contínuos às áreas de moradia. Registre-se o fato que no Pará

a produção familiar responde por cerca de 70% da produção total do Estado (Ipea, 2013b). Entre os principais produtos produzidos pela agricultura familiar local destinados ao mercado, destaca-se a mandioca, a pimenta-do-reino, a banana e a produção de leite.

Figura 4. Área ocupada por cada classe temática na classificação do grupo de atributos de Cloude-Pottier associado à coerência.

Registra-se ainda alta ocorrência de as classes de sucessões florestais, próximo a vila São Jorge, decorrentes do sistema tradicional de agricultura migratória (*shifting cultivation*) praticado pelos pequenos proprietários da localidade. Mediante análise da Figura 3, observa-se na porção norte e sudoeste, remanescentes preservados de floresta ombrófila densa, cujo maior percentual situa-se dentro dos limites da Floresta Nacional do Tapajós. Observa-se na Figura 3 a variabilidade de uso da terra no contato com o sistema florestal preservado, o que favorece o efeito de borda sob o sistema florestal, que envolve a alteração do microclima (Daviescolley et al., 2000; Redding et al., 2003) e como consequência, a alteração da dinâmica das espécies da fauna e flora nesta zona de contato (Didhan e Lawton, 1999).

A reestruturação do sistema portuário na região para a exportação de grãos e a pavimentação da BR-163, viabilizou estruturalmente a dinamização do uso da terra na região de influência da referida rodovia, principalmente pelas atividades agropecuárias, cujas modificações

ambientais diferem dos sistemas de roçado da população tradicional, aumentando, portanto, a pressão sobre a cobertura florestal natural (Fearnside, 2007). Na porção leste da área de estudo, próximo ao traçado da BR-163 (Figura 3), observa-se parte de polígonos destinados à agricultura mecanizada. Nesta localidade, cultivos extensivos de milho, soja, arroz, fazem parte do panorama de produção agrícola. De acordo com o Boletim Agropecuário do Estado do Pará (Fapespa, 2015), as culturas de milho (613.546 t) e soja (506.347 t) ocupam, respectivamente, o 3º e 4º lugar em volume de produção das culturas temporárias do Estado do Pará. A expansão destas culturas tanto na região circunvizinha à Flona do Tapajós, quanto no restante do Estado, ocorre sobre áreas antropizadas antes destinadas a pastagens. O que favorece a expansão da produção de grãos no Pará são fatores como: a) regularidade de chuvas e alta incidência de luz; b) solos de média e alta fertilidade; c) viabilidade de produzir duas safras anuais; c) proximidade de estruturas de escoamento de produção para o mercado internacional, como o terminal graneleiro de Santarém (Fapespa, 2015).

Conclusões

O presente estudo avaliou técnicas de decomposição polarimétrica de alvos integradas à informação de coerência interferométrica, utilizando o algoritmo classificador MAXVER-ICM, para análise do potencial discriminatório de nove classes de uso e de cobertura da terra de uma região tapajônica, situada no Estado do Pará. A partir do procedimento metodológico adotado, integrando dados SAR polarimétrico em banda L e coerência interferométrica em banda X, pode-se mapear um cenário composto por um mosaico de áreas de floresta ombrófila preservada e uma diversidade de classes de uso da terra. Os resultados sustentam que a BR-163 é importante vetor de transformação da paisagem na região, condicionando e orientando a produção agropecuária na região e seu escoamento.

Fica evidenciado o potencial de técnicas de decomposição de alvos, combinadas ou não à coerência interferométrica na banda X, como ferramental para estudos temáticos que incluam identificação de padrões de uso e cobertura da terra em ambiente amazônico, tornando os produtos obtidos na região das microondas complementares aos dados ópticos, na constante tarefa de monitorar a dinâmica antrópica nessa região.

Mesmo considerando o pequeno incremento de desempenho oferecido pela coerência, esse atributo interferométrico derivado da banda X mostra-se promissor em estudos de

mapeamento de uso da terra quando há necessidade de ampliar o rol de classes temáticas, como o adotado no presente estudo. Estudos recentes acerca da fusão de informações polarimétricas de banda L e aquelas tidas pelo uso do descritor de coerência interferométrica, têm-se mostrado importantes para estimativas de biomassa, por serem em conjunto, sensíveis às variações da estrutura dos diferentes tipos de vegetação, sobretudo nas trajetórias de processos sucessionais e de processos de degradação da paisagem florestal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de pós-graduação; ao CNPQ pela bolsa de produtividade em pesquisa; ao LBA-Santarém pelo suporte logístico na fase de campo; ao ICMBio/MMA - Sisbio (Processo 38157-5) pela autorização para atividade científica na Flona do Tapajós; à Agência Espacial Alemã (*Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt* - DLR) pela disponibilização das imagens do TanDEM-X/TerraSAR-X dentro da proposta *Structural analysis of central Amazon forest using TanDEM-X* (XTI_VEGE3408); ao Dr. Konstantinos Papathanassiou pelo suporte; e ao *Alaska Satellite Facility* pela concessão dos dados PALSAR/ALOS-1. Bispo, PC teve suporte da European Union's Horizon 2020 research and innovation programme pelo processo Marie Skłodowska-Curie n. 660020.

Referências

- Babamaaji, R.A., Lee, J., 2014. Land use/land cover classification of the vicinity of Lake Chad using NigeriaSat-1 and Landsat data. *Environmental Earth Sciences* 71, 4309-4317.
- Bispo, P.C., Santos, J. R., Valeriano, D.M., Touzi, R., Seifert, F.M. 2014. Integration of polarimetric PALSAR attributes and local geomorphometric variables derived from SRTM for forest biomass modeling in central Amazonia. *Canadian Journal of Remote Sensing* 40, 1-16.
- Brasil. iNDC, 2016. Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações Unidas sobre mudança do clima. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- Carreiras, J.M.B. et al., 2017. Mapping major land cover types and retrieving the age of secondary forests in the Brazilian Amazon by combining single-date optical and radar remote sensing data. *Remote sensing of environment* 194, 16-32.
- Cloude, S.R., Pottier, E., 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34, 498-518.
- Davies-Colley, R.J., Payne, G.W., Van Elswijk, M., 2000. Microclimate gradients across a forest edge. *New Zealand Journal of Ecology* 24, 111-121.
- Delgado-Aguilar, M.J. et al., 2017. Potential of TerraSAR-X and Sentinel 1 imagery to map deforested areas and derive degradation status in complex rain forests of

- Ecuador. *International Forestry Review* 19, 102-118.
- Didhan, R.K., Lawton, J.H., 1999. Edge structure determines the magnitude of changes in microclimate and vegetation structure in tropical forest fragments. *Biotropica* 31, 17-30.
- Fapespa, 2015. Boletim agropecuário do Estado do Pará. Disponível em: <http://www.fapespa.pa.gov.br/>. Acesso em: 25 jan. 2015.
- Fearnside, P.M., 2007. Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: The Environmental Cost of Paving a Soybean Corridor Through the Amazon. *Environ Manage.* 39, 601–614.
- Freeman, A., Durden, S. L., 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36, 963-973.
- Ipea, 2013. Texto para discussão: A agropecuária na região norte: oportunidades e limitações ao desenvolvimento. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/>. Acesso em: 29 jan. 2016.
- Lee J., Pottier, E., 2009. Polarimetric radar imaging from basics to applications. CRC Press, New York.
- Liesenberg, V.; de Souza Filho, C. R.; Gloaguen, R. 2016. Evaluating moisture and geometry effects on L-band SAR classification performance over a tropical rain forest environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9, 5357-5368.
- Lu, D., Batistella, M., Li, G., Moran E., Hetrick, S., Freitas, C.C., Dutra, L.V., Sidnei Sant'Anna, J.S. 2012. Land use/cover classification in the Brazilian Amazon using satellite images. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47, 1185-1208.
- Martins, F.D.S.R.V., Santos, J.R., Galvão, L.S., Xaud, H. A., 2016. M. Sensitivity of ALOS/PALSAR imagery to forest degradation by fire in Northern Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 49, 163-174.
- Minh, D.H.T. et al., 2016. SAR tomography for the retrieval of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana. *Remote Sensing of Environment*, 175, 138-147.
- Olesk, A., Praks, J., Antropov, O., Zalite, K., Arumäe, T., Voormansik, K. 2016. Interferometric SAR coherence models for characterization of hemiboreal forests using TanDEM-X data. *Remote Sens.* 8, 700-715.
- Otukei, J. R., Blaschke, T., Collins, M. 2015. Fusion of TerraSAR-x and Landsat ETM+ data for protected area mapping in Uganda. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 38, 99–104.
- Pereira, L. O.; Freitas, C.C.; Sant'Anna, S.J.S.S.; Reis, M. S. 2016. ALOS/PALSAR data evaluation for land use and land cover mapping in the Amazon region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9, 5413-5423.
- Redding, T.E., Hope, G.D., Fortin, M.J., Schmidt, M.G., Bailey, W.G., 2003. Spatial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest-clearcut edges in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science* 83, 121-130.
- Reis, M. S., Escada, M. I. S., Dutra, L. V., Sant'Anna, S. J. S., Vogt, N. D. 2018. Towards a Reproducible LULC Hierarchical Class Legend for Use in the Southwest of Pará State, Brazil: A Comparison with Remote Sensing Data-Driven Hierarchies. *LAND* 7, 1-29.
- Rozon, C., Lucotte, M., Davidson, R., Paquet, S., Oestreicher, J.S., Mertens, F., Passos, C.J.S., Romana, C. 2015. Spatial and temporal evolution of family-farming land use in the Tapajós region of the Brazilian Amazon. *Acta Amazonica* 45, 203-214.
- Santos, J.R., Galvão, L.S., Aragão, L.E.O.E.C. 2014. Remote Sensing of Amazonian forests: Monitoring, Structure, Phenology and Responses to environmental changes. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)* 66, 1413-1436.
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L.K., Nathawat, M.S. 2015a. A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12, 1779-1792.
- Sinha, S., Sharma, L.K., Jeganathan, C., Nathawat, M.S., Das, A.K., Mohan, S. 2015b. Efficacy of

- InSAR coherence in tropical forest remote sensing in context of REDD. *International Journal of Advancement in Remote Sensing, GIS and Geography* 3, 38-46.
- Silva, R.D., Galvão, L. S., Santos, J. R., Silva, C.V.J., Moura, Y. M.. 2014. Spectral/textural attributes from ALI/EO-1 for mapping primary and secondary tropical forests and studying the relationships with biophysical parameters. *GIScience and Remote Sensing* 51, 1-18.
- Touzi, R., 2007. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 73-84.
- Treuhaft, R.N., Lei, Y., Gonçalves, F.G., Keller, M., Santos, J.R., Neumann, M., Almeida, A.Q. 2017. Tropical-Forest Structure and Biomass Dynamics from TanDEM-X Radar Interferometry. *Forests* 8.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K., 1981. *Microwave remote sensing: Active and passive. v. I - Microwave remote sensing fundamentals and radiometry.* Artech House, Norwood, MA.
- Varghese, A.O., Suryavanshi, A., Joshi, A.K. 2016. Analysis of different polarimetric target decomposition methods in forest density classification using C band SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 37, 694-709.
- Wegmüller, U., Werner, C., 1997. Retrieval of vegetation parameters with SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 18- 24.
- Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., Yamada, H., 2005. Four-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Image Decomposition. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 43, 1699-1706.
- Yu, Y., Saatchi, S. 2016. Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests. *Remote Sensing-MDPI* 8, 1-18.