

USO DE IMAGENS ALOS/PALSAR MULTIPOLARIZADAS PARA DETECÇÃO DE INCREMENTO DE DESFLORESTAMENTO NA AMAZÔNIA

Use of Multipolarized ALOS/PALSAR Image for Detection of Increment of Deforestation in the Amazon

Sumaia Resegue Aboud Neta¹
Corina da Costa Freitas²
Luciano Vieira Dutra³

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Departamento de Processamento de Imagens – DPI
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
¹sumaia@dpi.inpe.br
²corina@dpi.inpe.br
³dutra@dpi.inpe.br

RESUMO

A floresta amazônica é uma região da floresta tropical que possui cerca de 5,4 milhões de km² e abriga uma ampla biodiversidade de espécies do planeta, porém, seu modelo tradicional de ocupação tem levado ao aumento significativo do desflorestamento na Amazônia Legal. Por serem regiões bastante úmidas, a presença de nuvens é constante, ocasionando limitações no imageamento por sensores. Deste modo, o uso de sensoriamento remoto por radar torna-se privilegiado, pois as microondas praticamente não sofrerem interferência atmosférica, o que permite o constante imageamento das áreas independente das condições climáticas da região. Assim, este estudo avaliou o potencial de imagens de radar do satélite ALOS para discriminar incremento de desflorestamento em uma área localizada na Floresta Nacional de Tapajós-PA. Foram utilizadas imagens multipolarizadas em amplitude do sensor PALSAR (banda L), onde realizou-se classificações e segmentações utilizando todas as combinações de canais: individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV e HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV). Foram avaliados os classificadores: pontual MAXVER-ICM e por regiões Bhattacharyya (com segmentações realizadas no SPRING e no SEGSAR). Os resultados foram comparados com um mapa temático de referência, construído a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES, com o intuito de verificar a existência de perda significativa de informação quando não se utiliza todos os canais de polarização, bem como encontrar a melhor combinação de canais para caracterizar o desflorestamento. Os melhores resultados foram obtidos quando a polarização dual HH+HV esteve presente, sendo que o classificador Bhattacharyya (maior valor *kappa* de 0,5085 para segmentação SPRING) apresentou maior acurácia em comparação ao classificador MAXVER-ICM. No entanto, a acurácia do produtor para esta classificação foi considerada baixa, devido ao erro de omissão (E.O.) ter sido elevado. Para as demais combinações de canais HH+HV, o menor E.O. foi obtido quando se utilizou a segmentação pelo SEGSAR, porém, o erro de inclusão (E.I.) foi superior em relação à classificação de maior *kappa*. Deste modo, realizou-se uma análise minuciosa da segmentação SPRING e SEGSAR para a combinação bivariada HH+HV com o intuito de verificar os fatores que levaram à incidência dos E.O. e E.I. na cena SAR. Constatou-se que grande parte dos polígonos inicialmente classificados como erros de inclusão (E.I.) pelo classificador Bhattacharyya foram detectados como novos desflorestamentos pelo PRODES do ano seguinte (2007), seja porque estavam sob nuvens no ano anterior ou realmente devido ao erro de omissão do PRODES. A análise indicou ainda que o baixo número de polígonos com E.O. na classificação SEGSAR (comparado com a segmentação SPRING) e o considerável número de polígonos inicialmente classificados como E.I., mas que na verdade eram áreas de desflorestamento omitidas pelo PRODES de referência, evidenciaram a eficácia do segmentador na detecção de desflorestamentos utilizando dados microondas. Assim, considerando a cobertura de nuvens na região Amazônica, comprovou-se a eficácia de dados SAR na detecção de incremento de desflorestamento. No entanto, constatou-se que a elevada porcentagem de E.O. da classificação devido principalmente às áreas com feições de queimadas, as quais possuem comportamento semelhante ao da floresta na imagem SAR, e ao efeito *double bounce* (devido ao acúmulo hídrico no solo alguns dias antes do imageamento, bem como a incidência de vestígios de biomassa presentes no solo na região de estudo), limitaram o uso do dado SAR.

Palavras chaves: Incremento de Desflorestamento, ALOS/PALSAR, PRODES, SEGSAR, Tapajós-PA.

ABSTRACT

The Amazon forest is a region of rainforest, which has about 5.4 million square kilometers, and with great biodiversity of species on the planet. However, its traditional model of occupation has led to significant levels of increase of deforestation in the Brazilian Legal Amazon. Through remote sensing, these areas can be constantly monitored, offering rates of control and estimation of deforested areas. Due to the high rainfall rates, humidity and presence of clouds, which characterize the Amazon region climate during the year, there are limitations in optical imaging. The ability of Radar sensors to acquire images through the clouds allows the continuous imaging of areas regardless of weather conditions in the region. In this context, this study evaluated the potential of the full-polarized amplitude PLR ALOS/PALSAR L band data to discriminate the deforestation increase over National Forest of Tapajós-PA. The radar image segmentations and classifications were performed. The MAXVER-ICM and Bhattacharyya (combined with SPRING and SEGSAR segmentations) classifiers were used for all combinations of the multipolarized images: HH, HV, VV, HH + HV, HV + VV, HH + VV and HH + HV + VV. The results were compared with the PRODES thematic map to detect the deforestation increment and the existence of significant information loss when all the polarized channels were not used, and to find the best polarization that characterizes the deforestation. The Bhattacharyya classifier had higher accuracy than MAXVER-ICM classifier. The best classifications were obtained when the HH + HV polarization (segmented by SPRING and SEGSAR) was used. The highest accuracy was obtained for the Bhattacharyya combined with SPRING segmentation (kappa of 0.5085). However, the HH + HV producer's accuracy was minor compared with other combinations of polarization because the error of omission (E.O.) has been higher. For the other channel combinations HH+HV, the lower E.O. was obtained when the SEGSAR segmentations were used but the error of inclusion (E.I.) was higher in relation to classification of higher kappa. There was a detailed analysis of the classifications Bhattacharyya (combined with SPRING and SEGSAR segmentations) for the HH+HV polarization. The results of the segmentation by SEGSAR showed that, considering the presence of clouds in the Amazon region, the minor E.O. compared with the segmentation by SPRING and the considerable number of polygons initially classified as E.I. which were detected as increase of deforestation by PRODES in the following year (2007), probably because its were under clouds in 2006 or due to E.O. by PRODES, proved the efficiency of the region based classification in the use of microwave data. The results showed that the use of radar mapping in tropical regions is an additional powerful tool for the soil cover information acquisition throughout the year. The combined radar and optical data is recommended for the detection of new deforestation, the high E.O. of classification caused mainly by areas of the deforestation fire, which are similar the forest in the SAR image, and the double bounce effect (due to water accumulation in the soil a few days before the imaging radar, and the incidence of biomass (stump) in the soil in the region of study), has limited the use of radar.

Keywords: Increase of Deforestation, ALOS/PALSAR, PRODES, SEGSAR, Tapajós-PA.

1. INTRODUÇÃO

Por abrigar uma grande variedade de espécies vegetais e animais, as florestas tropicais e subtropicais caracterizam-se como ambiente de alta biodiversidade, tendo um importante papel nos ciclos biogeoquímicos. Durante os últimos anos, o desflorestamento intensivo destas áreas tem agregado diversos fatores negativos ao globo terrestre, sendo responsável por um quinto das emissões globais de gases de efeito estufa, e ainda, essa crescente destruição das florestas tropicais forma uma “faixa” ao redor do equador e resfriam o clima da Terra, sendo um dos principais fatores ocasionais de mudanças climáticas (GLENDAY, 2006).

A Floresta Amazônica é a maior e a mais diversa região de florestas tropicais no mundo, distribuindo-se por cerca de 5,4 milhões de km² (MALHI *et al.*, 2008), englobando no Brasil os estados do Amazonas, Amapá, Acre, Roraima, Rondônia, Pará, Tocantins Maranhão e Mato Grosso, os quais compreendem a chamada Amazônia Legal. Originalmente, a cobertura florestal dessa região ocupava aproximadamente 4 milhões de km², dos quais

atualmente cerca de 82,3% encontram-se preservados (ALVES, 2007; PRODES, 2009).

O modelo tradicional de ocupação da Amazônia tem levado a um aumento significativo do desflorestamento na Amazônia Legal, e, por se tratar de um fenômeno de natureza bastante complexa não pode ser atribuído a um único fator. As questões mais urgentes em termos da conservação e uso dos recursos naturais da floresta dizem respeito à perda em grande escala de funções críticas da Amazônia frente ao avanço do desflorestamento ligado às políticas de desenvolvimento na região. Estudos evidenciam que esse desflorestamento está intimamente relacionado com o aumento das atividades econômicas em larga escala, especulação de terra ao longo das estradas, crescimento das cidades, aumento dramático da pecuária bovina, exploração madeireira e agricultura familiar - principalmente ligada ao cultivo de soja e algodão (ALENCAR *et al.*, 2004; FEARNSSIDE, 2003).

O uso de dados ambientais, adquiridos por intermédio de satélites, tem permitido estudos com maior profundidade de investigação e, principalmente, com maior confiabilidade. Em vista disso, tem sido realizado um grande esforço, pela comunidade científica

mundial, em pesquisas de monitoramento ambiental por sensores ópticos e de microondas. (KERR e OSTROVSKY, 2003).

Devido à intensa cobertura de nuvens em florestas tropicais, principalmente ao longo dos meses de novembro a março, e por serem regiões bastante úmidas, a extração de informações das imagens por meio de sensores ópticos muitas vezes torna-se insatisfatória, representando um obstáculo para o monitoramento contínuo da região por meio do sensoriamento remoto obtido por sensores passivos (ASNER, 2001). Já os sensores de microondas, entre os quais se incluem os radares de abertura sintética (SAR), podem ser utilizados sob quaisquer condições de tempo e visibilidade.

Por se tratar de sistemas ativos, e com maiores comprimentos de onda, os radares imageadores não dependem da reflexão da iluminação solar e das condições atmosféricas e deste modo têm se mostrado uma ferramenta útil no processo de caracterização, inventário e monitoramento florestal. Além disso, a utilização de dados SAR tem como finalidade acrescentar informações além das já fornecidas pelos dados ópticos e como outra vantagem à detecção de mudança da cobertura vegetal e a quantificação e qualificação da estrutura do dossel (ROSENQVIST *et al.*, 2003). Logo, em áreas de florestas tropicais como a região amazônica tornam-se fundamentais, pois as interferências externas como nuvens, fumaça, bruma e chuva, as quais restringem o uso de sensores ópticos, são mínimas (PARADELLA *et al.*, 2005). No entanto, apesar da plataforma orbital SAR ser capaz de integrar diversos produtos polarimétricos, o modo operacional possui algumas limitações (devido ao modo com todas as polarizações muitas vezes se tornar custoso e restrito).

Dentro de todo esse contexto, o presente artigo tem por finalidade testar a hipótese de que é possível discriminar incremento de desflorestamento (área desflorestada por corte raso há no máximo um ano) na Amazônia Legal a partir de dados multipolarizados obtidos em banda L pelo radar ALOS/PALSAR. Inserido neste objetivo, foram realizadas classificações e segmentações em uma área de estudo localizada na região da Floresta Nacional de Tapajós no Pará, cujos resultados foram avaliados a partir da análise de concordância com o mapa de desflorestamento produzido a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES, com o intuito de verificar se o tipo de classificador e segmentação utilizada influencia significativamente no resultado da detecção do incremento de desflorestamento. Estas segmentações e classificações foram aplicadas aos dados univariados, bivariados e multivariados para a determinação do melhor conjunto: segmentador, classificador e polarização para a detecção de incremento de desflorestamento. Além disso, foi analisado se há perda significativa de informação mediante o tipo de polarização empregada através do uso de imagens multipolarizadas SAR na floresta tropical.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Devido a grande gama de trabalhos realizados na região pelo INPE, assim como a disponibilidade de imagens SAR do radar ALOS/PALSAR, bem como dados relativos a trabalhos de campo e a diversidade das classes de ocupação do solo existentes (como florestas primárias, pastagem e vegetação em diversos estágios de regeneração), a região da Floresta Nacional (Flona) de Tapajós foi escolhida como área de estudo.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está situada dentro da área da Floresta Nacional de Tapajós no oeste do Estado do Pará, ao sul da cidade de Santarém, entre as latitudes S 02° 39' 26" a S 03° 31' 24" e longitude O 54° 37' 58" a Oeste 55° 14' 22" (Figura 1).

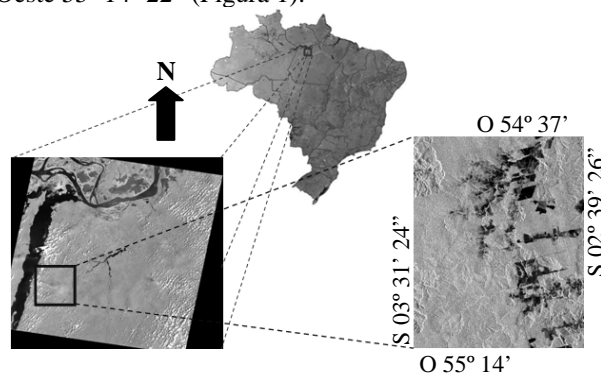


Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo na FLONA de Tapajós-PA. Em destaque é ilustrado a área de estudo com a imagem Landsat TM de 09/11/2006 (composição R5G4B3) e imagem ALOS/PALSAR de 21/10/2006 (composição HH(R)HV(G)VV(B)).

A Flona de Tapajós é uma unidade de conservação federal criada pelo decreto N.º 73.684 – de 19 de fevereiro de 1974. Abrange uma área aproximada de 544 mil hectares, localizados em terras de quatro municípios: Aveiro, Belterra, Rurópolis e Placas no oeste do estado do Pará (COHENCA, 2007). Tem como limite norte a área urbana do município de Belterra, a leste a rodovia BR 163 - Santarém/Cuiabá, a oeste o Rio Tapajós e ao sul os rios Tinga e Cupari. O relevo varia de plano a suavemente ondulado com altitude máxima de 280m. O período de chuvas inicia em Dezembro e termina em Junho, sendo o volume médio anual de precipitação de 1911 mm. A vegetação é composta basicamente por florestas ombrófilas e por algumas áreas de floresta secundária em diferentes estágios de sucessão (SHIMABUKURO *et al.*, 1997).

A área de estudo apresenta várias regiões desmatadas ao longo dos anos, sendo na maior parte devido à ocupação da agricultura de subsistência e pecuária. As atividades agrícolas são basicamente ligadas à produção de grãos, como o arroz, milho e cultivo de soja, tendo a produção desta última aumentado nos últimos anos devido ao crescimento na

demanda do mercado exterior, principalmente com relação à China (VENTURIERI, 2007).

As áreas desmatadas concentram-se principalmente ao longo da rodovia BR-163 e adjacências. Desde 2001, com a construção de um porto graneleiro e com diversos incentivos, a produção de grãos tem se alastrado aos arredores de Santarém, no norte da BR-163, e sofrendo assim um acelerado processo de desflorestamento de áreas para a agricultura mecanizada. Segundo dados do INPE (2008), a extensão total do desflorestamento para a cena da área de estudo (Órbita227/Ponto 62) foi de aproximadamente 116,24Km² entre 2004/2005, 83,84Km² entre 2005/2006, 127,51Km² entre 2006/2007, 130,57Km² entre 2007/2008 e 194,97 Km² entre 2008/2009. Para toda a Amazônia Legal, as taxas foram de 19.014Km² entre 2004/2005, 14.196Km² entre 2005/2006, 11.633Km² entre 2006/2007, 12.911Km² entre 2007/2008 e 7.008Km² entre 2008/2009.

2.2 Materiais Utilizados

2.2.1 Dados microondas e dados auxiliares

Foram utilizados dados ALOS/PALSAR multipolarizados em amplitude (PLR nível 1.5) adquiridos em 21 de Outubro de 2006 (Tabela 1), dados de campo obtidos em Outubro de 2005, imagens ópticas auxiliares anteriores e posteriores ao imageamento SAR (Landsat-5 TM e SPOT-4) e um mapa temático de desflorestamento gerado a partir das informações disponibilizadas pelo PRODES 2006 (Figura 2).

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM ALOS/PALSAR EM MODO PLR NÍVEL 1.5.

Formato/ N °de Looks:	Multilook / 4
Geometria:	Ground Range
Modo de Aquisição:	Polarimétrico (PLR)
Polarização:	HH/HV/VH/VV
Início do imageamento:	21/10/2006 as 02:20:48
Fim do imageamento:	21/10/2006 as 02:20:56
Resolução Espacial:	30 m
Espaçamento entre pixels:	12 m (range) x 12 m (azimute)
Ângulo de incidência:	24°
Ângulo off-nadir:	21,5°
Faixa de imageamento:	
Largura aproximada	34,8 km
Comprimento aproximado	63,6 km
Altitude do sensor:	698,522 km
Passagem:	Ascendente

Em regiões de florestas tropicais, a precipitação pluviométrica é uma das principais causas de concentração de umidade dos alvos, podendo esta umidade influenciar na capacidade de discriminação dos mesmos (ULABY *et al.*, 1986). Como informação complementar, é apresentada na Figura 3 a quantidade acumulada de precipitação pluviométrica da área de estudo (dados disponibilizados pelo Centro de Previsão

de Tempo e Clima - CPTEC). Os dados são do mês de Outubro de 2006, época em que foram adquiridos os dados ALOS/PALSAR, e se referem aos Postos de Coleta de Dados (PCD) mais próximos da área de estudo.

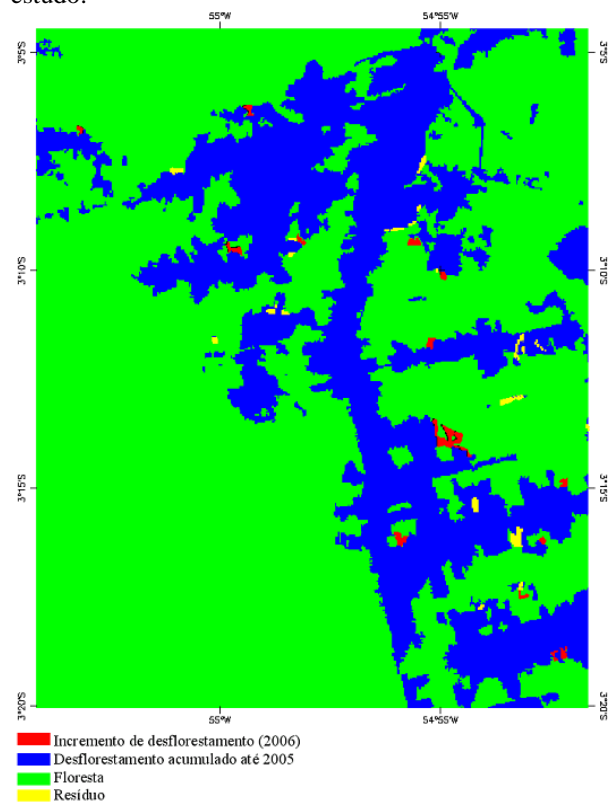


Figura 2 – Mapa de desflorestamento gerado a partir das informações do PRODES do ano base de 2006, referente à cena Landsat-5 TM 227/62 de 09/11/2006.

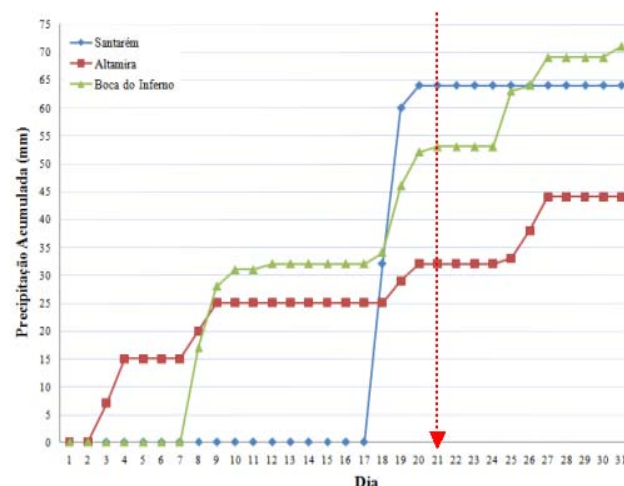


Figura 3 – Precipitação acumulada do mês de Outubro de 2006, nos PCDs mais próximos da área de estudo. A seta ilustra o dia do imageamento do ALOS/PALSAR.

2.2.2 Softwares e Hardware utilizados

Os aplicativos utilizados para o processamento dos dados foram: ENVI 4.5, *Polarimetric SAR Classifier 0.7* (CORREIA, 1998), SEGSAR (SOUZA

JR., 2005) e SPRING 5.0. O software ENVI foi utilizado no pré-processamento dos dados (descritos na seção 2.3), as classificações contextuais MAXVER-ICM foram realizadas no aplicativo *Polarimetric SAR Classifier* e as segmentações foram efetuadas utilizando-se o segmentador SEGSAR e a segmentação por crescimento de regiões do SPRING, onde foram utilizadas como informação de entrada nas classificações por regiões pela distância de *Bhattacharyya* (realizadas no SPRING). Todos os processamentos foram realizados em um microcomputador com processador Intel Pentil 4, com velocidade de processamento de 3.4 GHz, memória RAM de 2GBytes, capacidade do HD de 80 GBytes e sistema operacional Windows XP.

2.3 Metodologia

Na metodologia utilizada para detecção de incremento de desflorestamento, foram utilizados os classificadores supervisionados: estatístico de Máxima Verossimilhança Gaussiana (MAXVER) juntamente com o algoritmo iterativo ICM e classificador por regiões de Distância de *Bhattacharyya*. O procedimento metodológico pode ser dividido em quatro etapas, conforme o fluxograma da metodologia geral ilustrado na Figura 4.

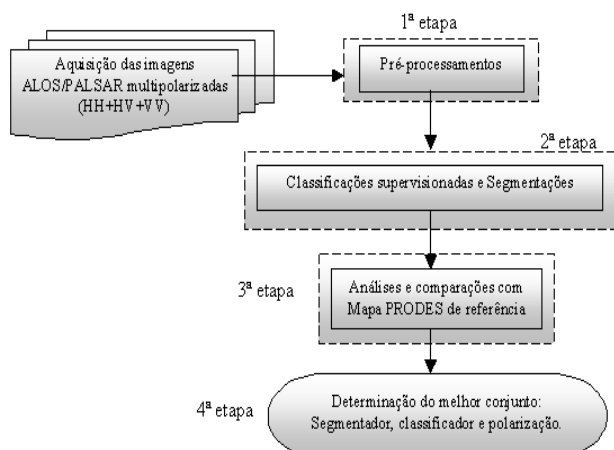


Figura 4 – Fluxograma da metodologia geral do trabalho.

A primeira etapa versou nos pré-processamentos da imagem ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006, entre os quais estão: recorte da área de estudo, conversão dos dados de amplitude para intensidade (uma vez que os dados *multilooks* devem ser gerados a partir da imagem em intensidade), reamostragem por média, registro (com base na imagem Landsat-5 TM de 09 de Novembro de 2006 onde a imagem SAR foi registrada pelo método polinomial através do polinômio de 1º grau utilizando o interpolador Vizinheiro mais Próximo), conversão dos dados de intensidade para amplitude e geração de Máscaras de Desflorestamento acumulado para posterior classificação.

Devido ao processo de reamostragem por média, a distribuição estatística da imagem original foi alterada devido à transformação nos níveis de cinza da imagem. Assim, o número equivalente de *looks* das imagens reamostradas passou a ser alto (em torno de 10) fazendo com que a distribuição fosse normalizada (FRERY, 1993).

A máscara de desflorestamento composta pelas classes “desflorestamento acumulado” e “resíduo” foi gerada mediante arquivo *shapefile* disponibilizado pelo PRODES, com o intuito de “mascarar” no processamento de classificação e segmentação as áreas desmatadas anteriormente (Figura 5).

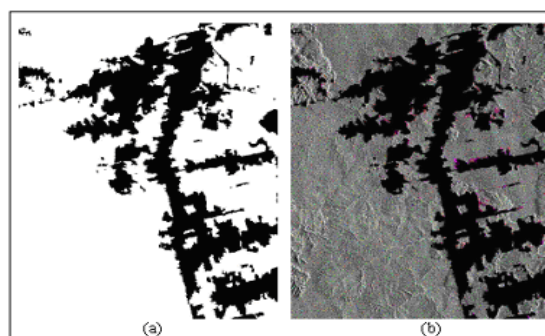


Figura 5 – (a) Máscara de desflorestamento acumulado e resíduo. A área em branco representa as áreas a serem classificadas e a área em preto as áreas já desmatadas que não foram levadas em consideração no processo de classificação e segmentação; (b) Máscara sobre a imagem ALOS/PALSAR em amplitude utilizada na classificação e segmentação.

A segunda etapa consistiu nas classificações e segmentações da imagem ALOS/PALSAR. A partir das imagens ópticas auxiliares e do mapa produzido a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006, foram obtidas as amostras de floresta e incremento de desflorestamento utilizadas nas classificações. Para evitar a amostragem de *pixels* próximos às bordas das classes, regiões onde podem existir erros de omissão e inclusão na classificação, devido ao deslocamento entre o mapa PRODES de referência e as imagens ALOS/PALSAR utilizadas na classificação, o mapa do projeto PRODES foi submetido à aplicação de filtros morfológicos de erosão onde as dimensões das janelas foram definidas com base na interpretação visual do mapa do PRODES sobreposto às imagens Landsat TM e a imagem ALOS/PALSAR. À classe incremento de desflorestamento aplicou-se um filtro de erosão com dimensão 3x3, e, à classe floresta um filtro com dimensão 5x5.

Os erros próximos às bordas estão relacionados ao deslocamento entre o mapa PRODES de referência e as imagens ALOS/PALSAR utilizadas na classificação. Em geral, o problema do deslocamento pode ser devido aos erros de aquisição de GCP's (*Ground Control Points*), acarretando distorções no co-registro das imagens utilizadas no PRODES ao longo dos anos (fazendo com que o erro de registro fosse acumulativo e conseqüentemente acarretando no

deslocamento dos dados), aos erros de edição dos mapas do PRODES e por fim o fato da classe “desflorestamento acumulado” dos mapas do PRODES até 2006 terem sido geradas a partir de imagens Landsat TM reamostradas para 60m o que produziu bordas pouco detalhadas em relação às bordas das feições observadas nas imagens sintéticas Landsat TM e ALOS/PALSAR.

Para a seleção de amostras de treinamento da classe incremento de desflorestamento, realizou-se amostragens de forma automática em cada um dos polígonos de incremento do mapa de referência erodido, para que a seleção não fosse tendenciosa. Deste modo, nem todos os polígonos de incremento disponibilizados pelo PRODES foram utilizados como amostra. Os 14 polígonos originalmente disponibilizados foram fragmentados de forma automática em porções menores gerando 20 polígonos, dos quais se utilizou 13 levando em consideração a máxima distância visual entre eles (Figura 6), totalizando 1131 *pixels* (equivalente a 88,15% da quantidade de *pixels* da classe erodida). Na Tabela 2 encontram-se informações sobre as amostras de floresta e incremento de desflorestamento utilizadas nas classificações.

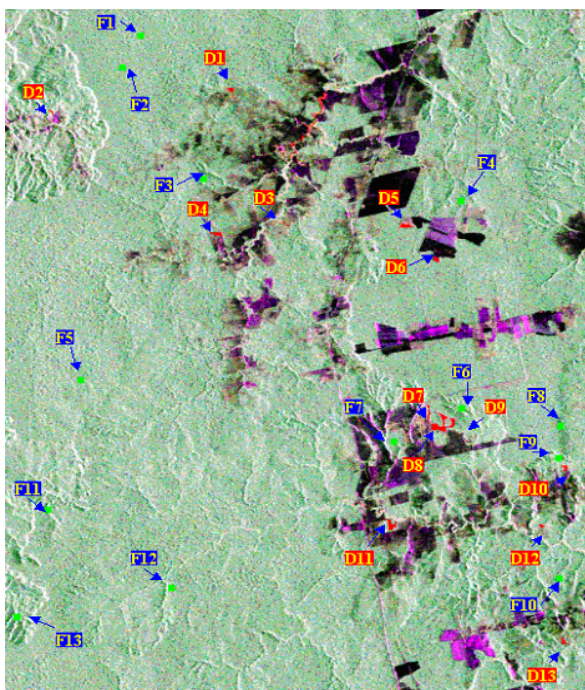


Figura 6 – Imagem ALOS/PALSAR em amplitude composição R(HH)G(HV)B(VV) com as amostras utilizadas na classificação: 13 da classe floresta (cor verde: 1300 *pixels*) e 13 da classe incremento de desflorestamento (cor vermelho: 1131 *pixels*).

Com a finalidade de avaliar se há perda significativa de informação no mapeamento de desflorestamento com dados PALSAR quando não se utiliza todos os canais de polarização, foram testados os classificadores automáticos: estatístico com informação contextual MAXVER-ICM e classificador por regiões da Distância de Bhattacharyya.

TABELA 2 – AMOSTRAS UTILIZADAS NAS CLASSIFICAÇÕES.

Classes	Filtro de erosão		Número de amostras
Floresta	5x5	Eliminação de 53622 <i>pixels</i> (9,85% da classe original), restando 490439 <i>pixels</i>	1300 <i>pixels</i> 13 polígonos
Incremento	3x3	Eliminação de 1179 <i>pixels</i> (47,88% da classe original), restando 1283 <i>pixels</i>	1131 <i>pixels</i> 13 polígonos (88,15% do total de <i>pixels</i> da classe erodida)

O classificador de máxima verossimilhança é um método de classificação *pixel a pixel* no qual dado uma imagem com N *pixels*, cada *pixel* (descrito pelo seu vetor de atributos x) será classificado como sendo da classe ω_j se

$$g_j(x) > g_k(x) \text{ para todo } j \neq k, j, k = 1, \dots, N \quad (1)$$

onde g_j é denominada função discriminante para a classe ω_j .

Para o classificador MAXVER, onde os dados seguem uma distribuição gaussiana multivariada, a função discriminante pode ser definida como:

$$g_j(x) = -\frac{1}{2}(x - m_j)' \Sigma_j^{-1}(x - m_j) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_j| + \ln P(\omega_j) \quad (2)$$

onde m_j e Σ_j correspondem ao vetor de média e a matriz de covariância e $P(\omega_j)$ é a probabilidade a priori da classe j . As médias e matrizes de covariância das classes de interesse são estimadas a partir de amostras conhecidas. As probabilidades a priori são normalmente consideradas iguais e desprezadas no cálculo da função de comparação (DUTRA e HUBER, 1999). No entanto, para melhorar o resultado da classificação é necessário um classificador que além de considerar o vetor de observações do *pixel*, incorpore a informação da vizinhança deste *pixel*. Um desses classificadores é o ICM (CORREIA *et al.*, 1998), o qual se baseia na teoria de campos markovianos. Deste modo, considerando iguais as probabilidades a priori de cada classe, a função discriminante pode ser definida por:

$$g_j(x) = -\frac{1}{2}(x - m_j)' \Sigma_j^{-1}(x - m_j) \dots - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_j| + \beta \succ \{t \in \delta_x : \omega_t = \omega_x\} \quad (3)$$

onde β é um parâmetro real que quantifica a influência das classes vizinhas, sendo estimado iterativamente, \succ representa o número de elementos de um conjunto, t denota a coordenada de um *pixel* e δ_x é o conjunto de coordenadas em torno da posição de x .

A classificação MAXVER-ICM foi realizada mediante recorte “mascarado” multipolarizado em amplitude. Primeiramente, foi realizada a classificação por máxima verossimilhança e em seguida empregou-se

o algoritmo ICM utilizando um dos dois critérios de parada: 8 iterações ou 5% de mudanças. As imagens multipolarizadas em amplitude foram classificadas individualmente (HH, HV, VV) com o ajuste de diferentes distribuições associadas para cada classe (VIEIRA, 1996), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto em amplitude (HH+HV+VV) com o uso da distribuição Normal multivariada, produzindo um total de 7 classificações.

Para o classificador por regiões da medida de distância de *Bhattacharyya*, a imagem segmentada é classificada e tem por intuito medir a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais, ou seja, através desta tem-se a distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais. Essa distância média é calculada por (RICHARDS, 1995):

$$BD(m_i, m_j) = \frac{1}{8} (m_i - m_j)^t \left\{ \frac{\sum_i + \sum_j}{2} \right\}^{-1} (m_i - m_j) \dots$$

$$\dots + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{|\sum_i + \sum_j|}{2(|\sum_i|^{1/2} + |\sum_j|^{1/2})} \right\}^{-1} \quad (4)$$

onde as classes *i* e *j* são assumidas por terem distribuição normalmente distribuída com média e covariâncias de m_i e m_j , \sum_i e \sum_j , respectivamente.

Por ser um classificador por regiões, a distância de *Bhattacharyya* requer como parâmetro uma imagem segmentada, sendo utilizado neste trabalho dois métodos de segmentações: um pelo SPRING (CAMARA *et al.*, 1996) e outro através do segmentador multiníveis SEGSAR (SOUZA JR., 2005), com o intuito de avaliar os possíveis resultados da classificação final e conseqüentemente a existência ou não de perda de informações devido aos canais polarimétricos utilizados.

Na segmentação realizada pelo SEGSAR, utilizaram-se os seguintes parâmetros: nível de compressão da imagem igual a 5, modelo de representação dos dados como mancha (*cartoon*), similaridade de 1decibel (dB), área mínima de 60 *pixels*, número equivalente de *looks* igual a 10, nível de confiança de 95% e formato da imagem em amplitude. Os limiares foram estipulados com base em diversos testes almejando encontrar os valores que visualmente melhor se adequassem a segmentação das diferentes feições da imagem, bem como o cuidado de se levar em consideração um mapeamento de área mínima mapeada de áreas desflorestadas através do ALOS/PALSAR que fosse inferior ao de 6,25 ha mapeada pelo PRODES. Deste modo, como a imagem foi reamostrada por média, para a mesma resolução da Landsat TM (30m x 30m) utilizada no PRODES, para o limiar estipulado de 60 *pixels* de área mínima, foi possível um mapeamento através do ALOS/PALSAR de áreas não inferiores a 5,4 ha, equivalente a uma área mínima de 0,054 Km² (ou 54000 m²).

Para a segmentação por crescimento de regiões realizada no SPRING, foi utilizado os limiares de 9 nível de cinza para a similaridade e 60 para a área mínima em *pixels*. O limiar de similaridade 9 foi escolhido por ser o que visualmente melhor se aproximou da segmentação realizada no SEGSAR para similaridade de 1dB.

Para cada combinação de canais (individualmente, aos pares e em conjunto) realizou-se uma segmentação, resultando em um total de 14 segmentações (7 segmentações pelo SPRING e 7 segmentações pelo SEGSAR).

As imagens foram classificadas individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV), produzindo um total de 14 classificações (7 devido à segmentação pelo SPRING e 7 devido à segmentação pelo SEGSAR).

A terceira etapa consistiu na validação das classificações mediante a obtenção das matrizes de confusão.

Neste trabalho foi utilizado como método de validação o Coeficiente de Concordância *Kappa*, descrito em Hudson e Ramm (1987), para realizar o teste da classificação, bem como os testes de hipóteses bilaterais, para comparação das matrizes de confusão das classificações obtidas ao nível de significância de 5%.

Comparando-se a imagem classificada com amostras de teste específicas ou com imagens verdade que estejam co-registradas, pode-se obter uma matriz de confusão, onde são apresentadas as quantidades e/ou percentagem de *pixels* classificados correta e incorretamente em cada classe. Deste modo, pode-se inferir da matriz de confusão tanto os erros de inclusão quanto os erros de omissão. Os erros de inclusão (ou comissão) são denominados erros do consumidor e são definidos como os *pixels* que são erroneamente incluídos em uma dada classe quando na verdade deveriam ser associados à outra classe. Já os erros de omissão (ou exclusão), são denominados erros do produtor e são os *pixels* omitidos de sua correta classe e associados à outra classe (CONGALTON e GREEN, 1999). Além disso, a matriz de erro permite também calcular outras medidas de exatidão como a exatidão total ou acurácia global (STORY e CONGALTON, 1986).

Na Tabela 3 é ilustrado os conceitos das classificações baseados no coeficiente *Kappa* obtido mediante a matriz de confusão, mais detalhes podem ser encontrados em Landis e Koch (1977).

TABELA 3 – CONCEITOS KAPPA.

<i>Kappa</i>	Conceito
$k < 0$	Péssimo
$0 < k < 0,2$	Ruim
$0,2 < k < 0,4$	Razoável
$0,4 < k < 0,6$	Bom
$0,6 < k < 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k < 1$	Excelente

O mapa de desflorestamento produzido a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006 foi utilizado como referência para validação das classificações. A partir das matrizes de confusão, realizaram-se as análises de exatidão das classificações com base no coeficiente de concordância *Kappa* de cada classificação, bem como a análise dos erros de omissão e inclusão e acurácias do produtor e do usuário.

A quarta etapa consistiu na determinação do melhor conjunto: segmentador (influência ou não da segmentação), classificador e polarização, a partir da análise dos resultados e coeficientes *Kappa* obtidos na etapa 3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, é apresentado o desempenho dos canais para as classificações MAXVER-ICM e *Bhattacharyya* (com segmentações SPRING (SP) e SEGSAR (SS)).

TABELA 4 – ACURÁCIA DAS CLASSIFICAÇÕES.

Classificador:	Conceito Global:			Classe incremento de desflorestamento:			
	Kappa Global (\hat{k})	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2 (10^{-5})$	A.P. (%)	Kappa	E.L. (%)	E.O. (%)
MAXVER-ICM HH	0,0013	Ruim	0	54,87	0,0006	99,68	45,13
MAXVER-ICM HV	0,0506	Ruim	0,33	61,26	0,0264	97,10	38,74
MAXVER-ICM VV	0,0002	Ruim	0	95,09	0,0001	99,73	4,71
MAXVER-ICM HH+HV	0,0718	Ruim	0,49	76,07	0,0377	95,98	23,93
MAXVER-ICM HV+VV	0,0258	Ruim	0,08	73,89	0,0131	98,43	26,11
MAXVER-ICM HH+VV	0,0073	Ruim	0,01	71,71	0,0037	99,37	28,29
MAXVER-ICM HH+HV+VV	0,0586	Ruim	0,32	80,05	0,0304	96,70	19,95
<i>Bhattacharyya</i> SP HH	0,1602	Ruim	4,43	36,09	0,1034	89,42	63,91
<i>Bhattacharyya</i> SP HV	0,4212	Bom	12,64	50,35	0,3629	63,54	49,65
<i>Bhattacharyya</i> SP VV	0,3289	Razoável	13,25	36,09	0,3036	69,46	63,91
<i>Bhattacharyya</i> SP HH+HV	0,5085	Bom	12,97	57,29	0,4580	54,06	42,71
<i>Bhattacharyya</i> SP HV+VV	0,4399	Bom	13,51	49,10	0,3995	59,90	50,90
<i>Bhattacharyya</i> SP HH+VV	0,3692	Razoável	15,27	36,09	0,3798	61,86	63,91
<i>Bhattacharyya</i> SP HH+HV+VV	0,5086	Bom	12,91	57,52	0,4567	54,19	42,48
<i>Bhattacharyya</i> SS HH	0,2219	Razoável	2,87	92,99	0,1260	87,17	7,01
<i>Bhattacharyya</i> SS HV	0,2442	Razoável	3,09	100	0,1391	85,87	0
<i>Bhattacharyya</i> SS VV	0,1843	Ruim	2,33	84,96	0,1034	89,43	15,04
<i>Bhattacharyya</i> SS HH+HV	0,3862	Razoável	6,23	92,83	0,2439	75,41	7,17
<i>Bhattacharyya</i> SS HV+VV	0,3102	Razoável	4,38	100	0,1836	81,43	0
<i>Bhattacharyya</i> SS HH+VV	0,2854	Razoável	4,69	83,55	0,1722	82,57	16,45
<i>Bhattacharyya</i> SS HH+HV+VV	0,4791	Bom	7,12	99,84	0,3151	68,31	0,16

Os valores referem-se à acurácia da classificação e foram obtidos estatisticamente por meio do valor *Kappa* (\hat{k}) global da classificação, do conceito e da variância do *kappa* ($\hat{\sigma}_k^2$). Para a classe incremento de desflorestamento é ilustrado a acurácia do produtor (A.P. = % dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento do mapa temático de referência do

PRODES 2006 que foram corretamente classificados), o *kappa* da classe e os erros de inclusão (E.I.) e omissão (E.O.) para as classificações realizadas.

A classificação pontual MAXVER-ICM não foi eficaz para a utilização dos dados SAR utilizados. Os baixos valores do *kappa* global (e do *kappa* da classe incremento de desflorestamento) bem como os altos E.I. fizeram com que a classificação pontual não fosse considerada eficiente em comparação com o mapa de validação do PRODES 2006. As classificações utilizando o classificador por regiões *Bhattacharyya* apresentaram resultados superiores em relação às classificações pontuais, porém, em ambos os casos as melhores classificações em geral foram obtidas quando se utilizou a polarização dual HH+HV, sendo o maior valor de *kappa* obtido quando se utilizou a segmentação pelo SPRING (*kappa* da classe de 0,4580 e *kappa* global da classificação de 0,5085), onde a acurácia do produtor foi de 57,29%.

A classificação por regiões com segmentação SEGSAR apresentou erros de omissão menores em comparação com os mesmos canais para a segmentação pelo SPRING, fazendo com que a acurácia do produtor fosse maior. No entanto, com exceção do canal HH, os erros de inclusão para a segmentação do SEGSAR foram maiores.

A Figura 7 mostra os intervalos com 95% de confiança para cada um dos coeficientes *kappa* obtidos da Tabela 4.

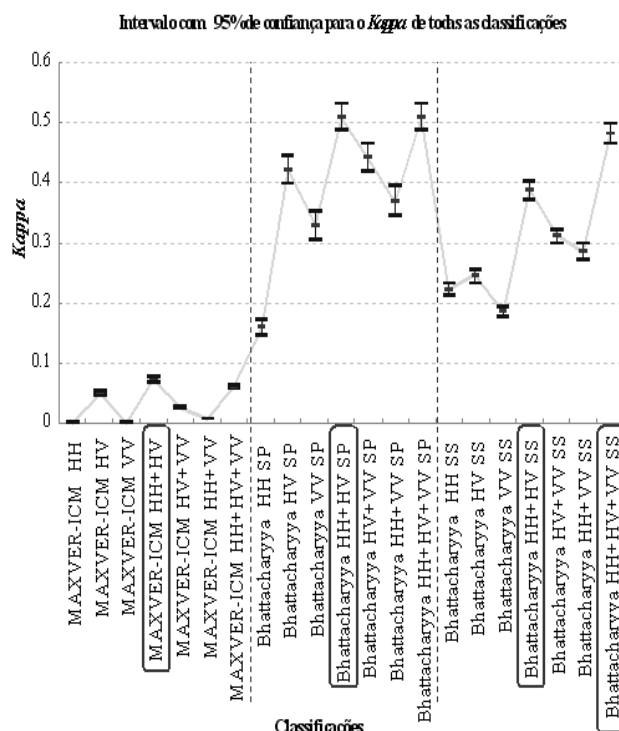


Figura 7 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações MAXVER-ICM e *Bhattacharyya* (segmentadas pelo SPRING e SEGSAR) na imagem amplitude classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV). Os círculos indicam as melhores classificações de acordo com índice *kappa*.

Em todas as classificações (univariadas, bivariadas e multivariadas) os piores resultados foram obtidos quando o canal HV não esteve presente, como pode ser observado na Tabela 4 e Figura 7.

Realizou-se um teste z bilateral e valor-p com o intuito de comparar as matrizes de confusão das classificações realizadas, onde foi possível inferir que ao nível de significância de 5% nenhuma das matrizes de confusão das classificações MAXVER-ICM são estatisticamente iguais. Porém, constatou-se que as seguintes matrizes das classificações por regiões de *Bhattacharyya* são equivalentes:

- Matriz de confusão do canal HV ($kappa$ de 0,4212) e polarização dual HV+VV ($kappa$ de 0,4399), ambos segmentados pelo SPRING, sugerindo que a informação do canal HV é equivalente à informação da polarização dual HV+VV.

- Matriz de confusão do conjunto HH+HV+VV ($kappa$ 0,5086) e matriz de confusão da classificação HH+HV ($kappa$ de 0,5085), ambos segmentados pelo SPRING, indicando que a informação do canal VV pouco influenciou no resultado desta classificação.

- Matriz de confusão da classificação da polarização dual HH+HV ($kappa$ de 0,3862) segmentada pelo SEGSAR e matriz da classificação HH+VV segmentada pelo SPRING ($kappa$ de 0,3692).

- Matriz de confusão da classificação HV+VV ($kappa$ de 0,3102) segmentada pelo SEGSAR e matriz univariada VV segmentada pelo SPRING ($kappa$ de 0,3289).

Na Tabela 5 é apresentado os valores $kappa$ e acurácia do produtor para os classificadores MAXVER-ICM e *Bhattacharyya* (SPRING e SEGSAR) para um (HV), dois (HH+HV) e três canais (HH+HV+VV) onde em geral a presença da polarização HV obteve os maiores valores de índices $kappa$. As cores iguais na tabela, indicam as classificações que são estatisticamente iguais entre si ao nível de significância de 5%, as demais classificações foram consideradas estatisticamente diferentes ao nível de confiança de 95%.

TABELA 5 – MAIORES VALORES $KAPPA$ E ACURÁCIA DO PRODUTOR (A.P.) ONDE EM GERAL A POLARIZAÇÃO HV ESTEVE PRESENTE.

Classificador	3 Canais (HH+HV+VV)		2 Canais (HH+HV)		1 Canal (HV)	
	$Kappa$	A.P. (%)	$Kappa$	A.P. (%)	$Kappa$	A.P. (%)
MAXVER-ICM	0,0586	80,05	0,0718	76,07	0,0506	61,26
<i>Bhattacharyya</i> SP	0,5086	57,52	0,5085	57,29	0,4212	50,35
<i>Bhattacharyya</i> SS	0,4791	99,84	0,3862	92,83	0,2442	100

Na Figura 8 é ilustrado em (a) o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações e em (b), (c) e (d) os resultados dos melhores valores $kappa$ para o classificador MAXVER-ICM e *Bhattacharyya* (segmentado pelo SPRING e SEGSAR) obtidos para a polarização dual HH+HV. Em (e) é apresentado o mais elevado valor de $kappa$ para a classificação *Bhattacharyya* segmentado pelo SEGSAR,

obtido quando se utilizou a polarização multivariada HH+HV+VV.

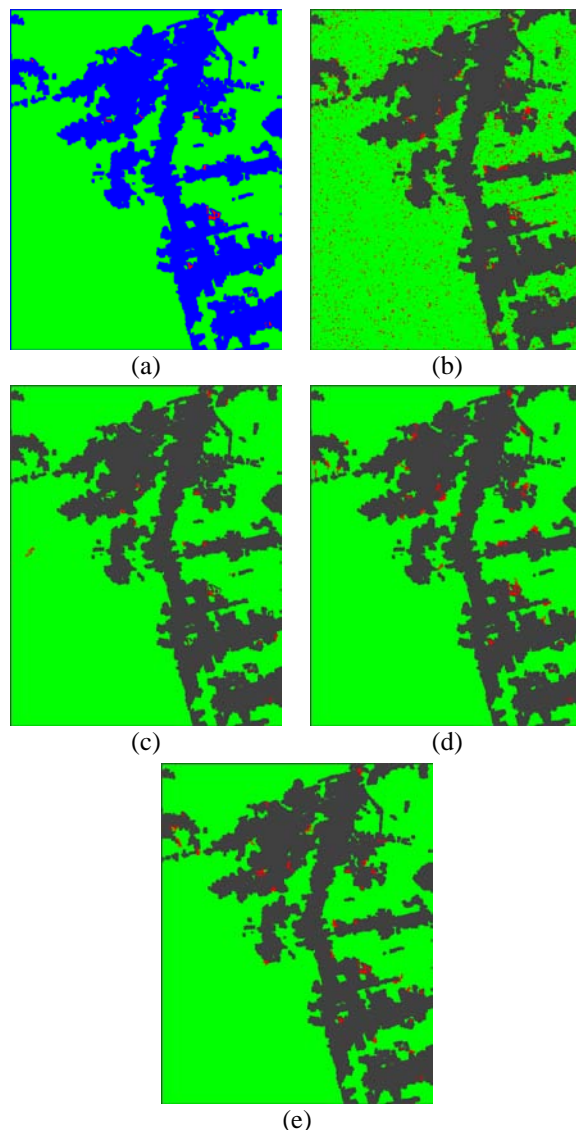


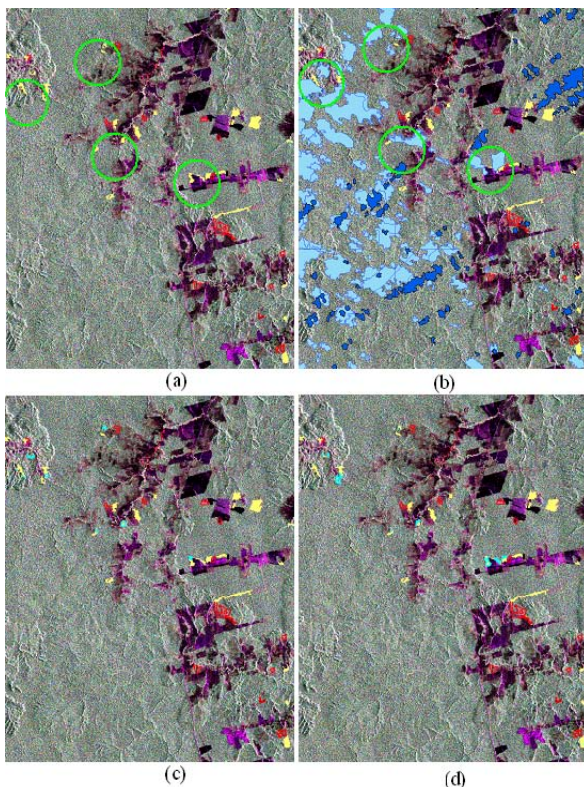
Figura 8 – (a) Mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações; (b), (c) e (d) representam os resultados dos melhores $kappas$ respectivamente para o classificador MAXVER-ICM e *Bhattacharyya* (SPRING e SEGSAR) obtidos para a polarização dual HH+HV; (e) é apresentado o mais elevado $kappa$ para a classificação *Bhattacharyya* segmentado pelo SEGSAR, obtido para a polarização multivariada HH+HV+VV.

Apesar do mapa temático com maior valor $kappa$ e conseqüentemente com melhor concordância com o mapa do PRODES 2006 ter sido obtido quando foi utilizado o classificador *Bhattacharyya* na imagem segmentada pelo SPRING utilizando os canais bivariados HH+HV ($kappa$ de 0,5085), a acurácia do produtor foi relativamente menor em comparação com as outras combinações de polarizações devido ao erro de omissão ter sido de 42,71%. Para as demais combinações de canais HH+HV, o menor erro de omissão foi obtido quando foi utilizada a segmentação pelo SEGSAR (E.O. de 7,17%), porém o erro de

inclusão foi maior em relação à classificação de maior *kappa* (E.I. de 54,06%), sendo de 75,41%. Deste modo, como ilustrado em Aboud Neta (2009), foi realizada uma análise minuciosa do melhor resultado encontrado e do correspondente do mesmo canal segmentado pelo SEGSAR, visto que na maioria das vezes, embora as classes sejam outras, alguns trabalhos evidenciam que os resultados apresentados pela segmentação SEGSAR apresentam valores *kappa* superiores para as classificações em relação às classificações que utilizam a segmentação pelo SPRING (ABOUD NETA *et al.*, 2009; DUTRA *et al.*, 2007, 2008).

3.1 Análise para as classificações por regiões HH+HV

A Figura 9 ilustra a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B).



- Nuvens na imagem utilizada pelo PRODES 2006
- Nuvens na imagem utilizada pelo PRODES 2007
- Incremento de desflorestamento em 2006
- Incremento de desflorestamento em 2007
- Exemplo de Incremento de desflorestamento em 2007, sob nuvem no ano anterior

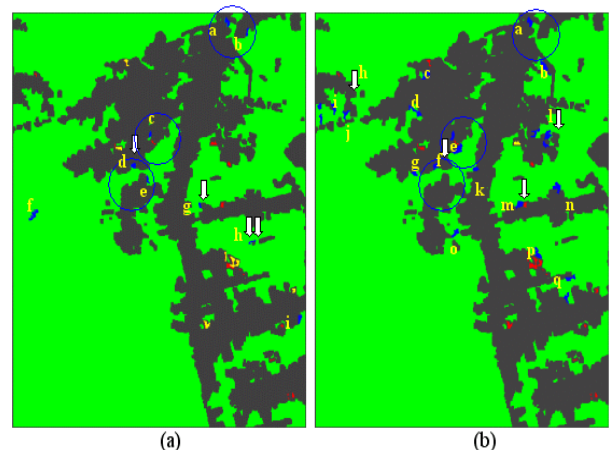
Figura 9 – Imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B) em (a) com os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 e 2007. Em (b) sobreposição da classe nuvem obtida do PRODES 2006. Em (c) a cor azul claro indica os polígonos sob nuvem desde 2005 e em (d) a cor azul claro os polígonos sob nuvem desde 2006.

Na Figura 9 (a) é apresentado os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 (polígonos vermelhos) e 2007 (polígonos amarelos) e em (b) a sobreposição da classe

nuvem dos anos de 2005, 2006 (obtidas pelo PRODES 2006 e ilustradas na cor azul claro) e do ano de 2007 (obtidas pelo PRODES 2007 e referenciadas na cor azul escuro).

De acordo com os dados disponibilizados pelo PRODES, em 2007 ocorreram 5598 *pixels* de incremento de desflorestamento distribuídos em 57 polígonos. Na Figura 9 (b), é possível evidenciar pelo exemplo dos círculos verdes que alguns dos polígonos mapeados como incremento de desflorestamento em 2007 estavam sob nuvens nos dados disponibilizados pelo PRODES 2006. Dos 57 polígonos mapeados como incremento de desflorestamento de acordo com o PRODES 2007, 10 estavam sob nuvem desde 2005 (Figura 9 (c)) e 16 sob nuvem no mapeamento realizado em 2006 (Figura 9 (d)).

Mediante informações descritas acima, realizou-se a análise dos erros de inclusão (E.I.) para as classificações HH+HV classificadas pela distância de *Bhattacharyya* segmentadas pelo SPRING (Figura 10 (a)) e SEGSAR (Figura 10 (b)). Os resultados foram analisados mediante auxílio das imagens Landsat TM e SPOT-4 e dos dados de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2007 (devido a considerável quantidade de nuvens na imagem Landsat TM utilizada pelo PRODES em 2006). Na Figura 10, os círculos representam áreas classificadas como E.I. que foram detectadas em ambas as classificações. As letras indicam todos os correspondentes E.I. de cada classificação e as setas mostram os polígonos detectados como E.I. na classificação e que foram discriminados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.



- Máscara do PRODES 2006 (Desflorestamento acumulado até 2005)
- Classificação: Floresta
- Classificação: Incremento de desflorestamento em 2006
- Classificação: Erros de omissão da classe incremento de desflorestamento
- Classificação: Erros de inclusão da classe incremento de desflorestamento
- Áreas classificadas como E.I. que foram detectadas em pelo menos duas dessas classificações.

Figura 10 – Classificações HH+HV: *Bhattacharyya* com segmentação SPRING (a) e SEGSAR (b). As letras indicam todos os correspondentes E.I. de cada classificação e as setas indicam áreas discriminadas como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.

A maioria dos incrementos de desflorestamento corretamente classificados, encontram-se em áreas com existência de solo exposto, como pode ser observado nos polígonos D6 e D9 da Figura 11 em comparação com os erros de omissão da Figura 12 (a), o que corrobora com os resultados apresentados por Guerra (2008) onde áreas desflorestadas que se tornaram solo exposto tiveram menores erros de omissão nas classificações com dados SAR.

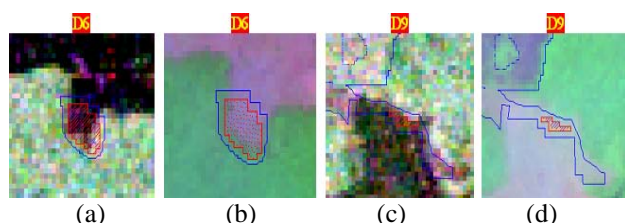


Figura 11 – Polígonos de incremento utilizados como amostras nas classificações. Em (a) e (c) é ilustrado a imagem ALOS/PALSAR de 21/10/2006, composição HH(R)HV(G)VV(B) e em (b) e (d) a imagem Landsat TM de 09/11/2006, composição 5(R)4(G)3(B).

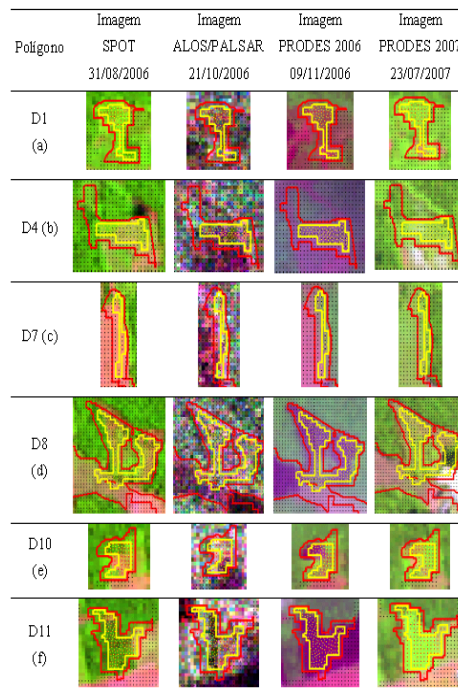
Na Figura 12 (a) é apresentado os erros de omissão da classe incremento de desflorestamento, obtidos a partir da classificação Bhattacharyya com segmentação SPRING. Os erros de omissão (E.O.) totalizaram 548 pixels distribuídos em 6 polígonos e foram discriminados pela cor amarela. Os erros de inclusão (E.I.) foram de 865 pixels distribuídos em 10 polígonos e ilustrados pela cor azul.

Na Figura 12 (b), as letras (d), (g), (h) e (i) ilustram os E.I. da classificação realizada, os quais foram detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007. O polígono representado pela letra (i) é adjacente a um polígono mapeado como incremento pelo PRODES 2007. Dos quatro polígonos detectados como incrementos em 2007, dois estavam sob nuvem, um desde 2005 (g) e o outro desde 2006 (d).

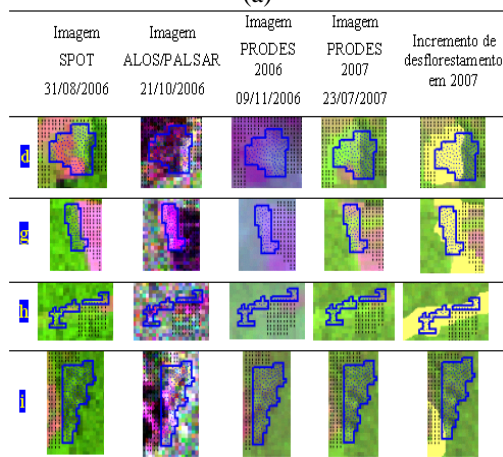
Conforme pode ser visualizado na imagem SPOT da Figura 12 (b), adquirida antes do imageamento SAR e anterior a imagem Landsat TM utilizada pelo PRODES 2006, no polígono (d) já havia a presença de solo parcialmente coberto por vegetação, sugerindo a presença de desmatamento (sugerindo a omissão do mapa do PRODES 2006).

Do mesmo modo que a análise realizada para o polígono (d), no polígono (g) pode-se constatar a omissão, ocasionada por nuvem, do desflorestamento no mapa de validação do PRODES 2006. Na imagem SPOT, cerca de dois meses anteriores ao imageamento SAR, os indícios de desflorestamento ainda não haviam ocorrido. Porém, é possível visualizar que na data de aquisição dos dados da imagem radar havia ocorrência significativa de solo exposto no polígono obtido a partir da segmentação pelo SPRING. Apesar da imagem utilizada pelo PRODES 2006 apresentar resquícios de nuvem, é possível observar a presença de solo exposto com textura não uniforme, o que pode ser melhor

ilustrado pela imagem de 23/07/2007 utilizada no PRODES 2007, podendo ser áreas de corte raso onde há vestígios de troncos e galhos no solo.



(a)



(b)

Figura 12 – (a) Erros de omissão (amarelo) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya HH+HV segmentada pelo SPRING. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados do PRODES 2006. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado; (b) Polígonos representativos dos erros de inclusão da Figura 10 (a), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.

Os polígonos detectados como E.I., que não estavam sob nuvem (Figura 12 (b) polígono (h)) e que foram discriminados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007, podem ter sido discernidos pelo radar antes do PRODES devido:

- No mapeamento do incremento pelo PRODES em 2006, talvez esses polígonos ainda não

tivessem a área mínima estipulada pelo PRODES para detecção (6,25 ha), e em 2007 devido ao limiar ser alcançado puderam ser discriminados.

- Os polígonos detectados como E.I. pela classificação utilizando como validação o PRODES 2006, podem tratar-se de regiões com padrões de desmatamento em processo de degradação florestal de intensidade leve, moderada ou alta que foram mapeados pelo PRODES 2007 por terem passado a ser corte raso.

- Ocorreu erro de omissão do PRODES 2006 ao não detectar o desflorestamento.

Como observado na Figura 12 (a), alguns E.O. foram obtidos em áreas com feições de queimadas, como no polígono D10 (e) e D11 (f). Evidenciou-se que tais polígonos possuem comportamento semelhante ao da floresta na imagem SAR e isso provavelmente é devido à vegetação que cresce após o corte e queima da floresta a qual pode ser capaz de mascarar a resposta do solo e provocar a diminuição do retorno em banda L na polarização HH. Deste modo, o contraste entre a floresta e os desflorestamentos são reduzidos ao longo do ano, fazendo com que os novos desflorestamentos que inicialmente apareciam claros na imagem de radar, escureçam ao passar do tempo. Assim, em um determinado momento o incremento terá uma tonalidade semelhante à da floresta, ocasionando os erros de omissão na classe incremento e inclusão na classe floresta (RIGNOT *et al.*, 1997).

Áreas como a do polígono D8 (d) da Figura 12 (a), podem representar os E.I. que ocorreram nas classificações SAR provavelmente devido ao acúmulo hídrico no solo alguns dias antes do imageamento do radar, bem como a incidência de vestígios de biomassa (galhos e troncos) presentes no solo.

Segundo Gonçalves (2005), a reflexão especular da água pode fazer com que a interação das microondas sejam refletidas especularmente na direção oposta da antena, e nenhum sinal seja registrado, formando assim superfícies escuras. Porém, o efeito de canto (*double bounce*), faz com que a iteração do pulso de energia do radar com áreas que contenham teor hídrico e o tronco das árvores, tenham um retorno amplificado na direção da antena do radar, ocasionando superfícies claras e em alguns casos os E.I., como pode ser evidenciado pelo exemplo na Figura 10 (a) pelas letras (a) e (b) representada em destaque na Figura 13.

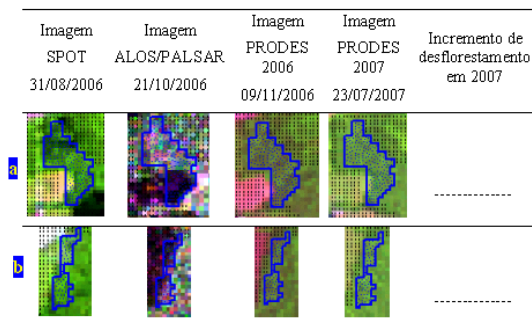


Figura 13 – Erros de inclusão provavelmente devido à reflexão especular da água aliada ao efeito *double bounce* com vestígios de biomassa.

Para a classificação com segmentação pelo SEGSAR (Figura 10 (b)), mesma análise anterior pode ser realizada. Na Figura 14, são apresentados os erros de omissão (a) e alguns exemplos de erros de inclusão (b) obtidos da classificação Bhattacharyya. Os erros de omissão totalizaram 92 *pixels* distribuídos em 1 polígono discriminado pela cor amarela. Os erros de inclusão foram de 3653 *pixels* distribuídos em 22 polígonos e ilustrados pela cor azul. Destes, 5 foram detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 (Figura 14 (b)) e representados pelas letras (f), (j), (l), (m) e (p). O polígono representado pela letra (p) é adjacente a um polígono mapeado como incremento pelo PRODES 2007. Destes 5 polígonos, houve nuvens desde 2006 em 2 deles (polígonos (f) e (m)).

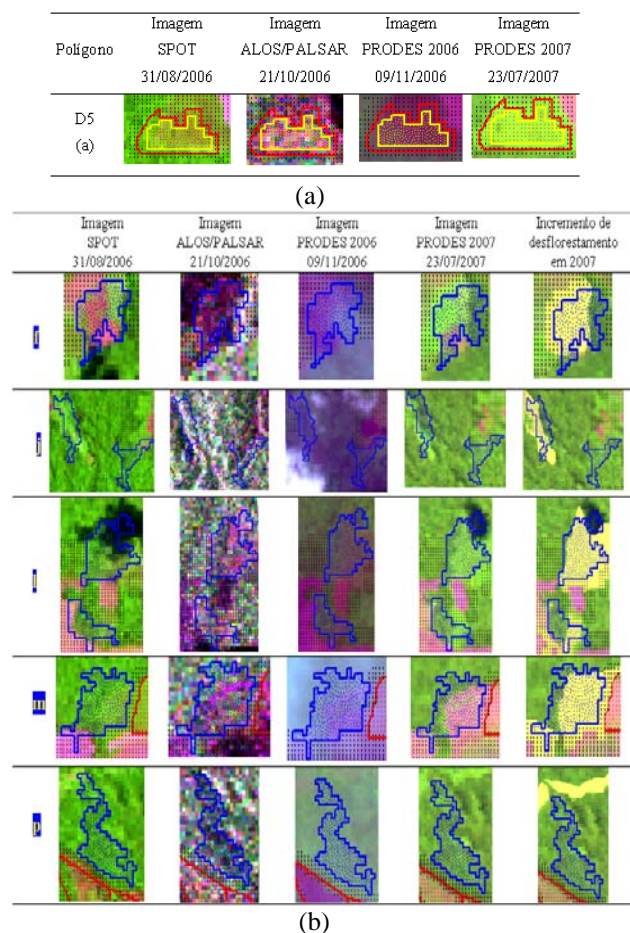


Figura 14 – (a) Erros de omissão (amarelo) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya HH+HV segmentada pelo SEGSAR. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado. (b) Polígonos representativos dos erros de inclusão da Figura 10 (b), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.

O polígono representado pela letra (f) (Figura 14 (b)), embora tenha formato diferente devido à

segmentação pelo SEGSAR, está localizado no mesmo local do polígono (d) da Figura 12 (b), cuja análise foi realizada anteriormente.

No polígono (m), é possível evidenciar a presença de solo exposto com textura não uniforme, o que pode ser mais bem visualizado pela imagem de 23/07/2007 utilizada no PRODES 2007, sendo caracterizado pelo predomínio de solo exposto com resquícios de vegetação.

O polígono (l) representa exemplo de regiões que embora não estivessem sob nuvens na data da imagem utilizada pelo PRODES 2006, as classificações obtidas com dados SAR anteciparam a detecção do incremento obtido pelo PRODES 2007. A análise do polígono permite inferir o erro de omissão do PRODES 2006, visto que a análise da imagem SAR, anterior ao imageamento utilizado no PRODES 2006, indica que provavelmente os polígonos representem áreas de queimadas com presença de vegetação e áreas com predominância de cobertura florestal, as quais podem ter sofrido algum tipo de perturbação (como por incêndio). Análise semelhante pode ser realizada para a maioria dos polígonos tidos como erros de inclusão obtidos pela segmentação do SEGSAR (representados pelas letras (e), (j), (k) e (n) da Figura 10 (b)). O restante dos polígonos representam em geral áreas em processo de degradação florestal de intensidade leve a floresta secundária com capoeiras).

A utilização da segmentação pelo SEGSAR permitiu a redução do número de polígonos com erro de omissão em comparação com a imagem sem filtro segmentada pelo SPRING. O polígono D5 (Figura 14 (a)) foi o único a apresentar erro de omissão, sendo que de acordo com análise da imagem SAR, provavelmente seja uma área de floresta degradada de intensidade alta com a presença de cicatrizes de fogo florestal associadas à manchas florestais.

Constatou-se assim que, embora a análise inicial dos resultados das classificações indicasse que o segmentador SEGSAR havia apresentado resultados inferiores (de acordo com o índice de concordância *kappa*) em relação às classificações *Bhattacharyya* utilizando segmentação pelo SPRING, a análise detalhada dos erros de inclusão e omissão indicou que o segmentador é uma “ferramenta” eficaz na detecção de incremento de desflorestamento. O baixo número de polígonos com erro de omissão, comparado com a segmentação SPRING, e o considerável número de polígonos inicialmente classificados como erros de inclusão os quais foram detectados como novos desflorestamentos pelo PRODES do ano seguinte (2007), seja porque estavam sob nuvens no ano anterior ou realmente devido ao erro de omissão do PRODES, salientaram a eficácia dos classificadores por regiões na utilização de dados microondas.

4. CONCLUSÕES

De posse dos resultados obtidos, pode-se concluir que o objetivo primordial do trabalho de detecção de incremento de desflorestamento utilizando

dados em banda L do radar ALOS/PALSAR foi alcançado, confirmando a hipótese inicial.

Considerando a cobertura de nuvens na região Amazônica, constatou-se que o uso de radar no mapeamento de regiões tropicais é uma “ferramenta” de auxílio para imagens ópticas na aquisição de informações referentes à cobertura do solo durante todo o ano, uma vez que os elevados erros de inclusão e em alguns casos omissão das classificações para detecção de novos desflorestamentos (provavelmente devido ao acúmulo hídrico no solo alguns dias antes do imageamento do radar, bem como a incidência de vestígios de biomassa (“tocos”) presentes no solo na região de estudo) limitou o uso do radar, sendo necessária a utilização de imagens ópticas para análise das informações adicionais obtidas.

O classificador “ponto a ponto” MAXVER-ICM não apresentou bom desempenho na classificação dos dados SAR devido à elevada porcentagem de erros de inclusão. Já o classificador por regiões de *Bhattacharyya*, apresentou uma performance relativamente boa, de acordo com o critério *kappa*, em comparação com o mapa de validação do PRODES 2006.

Para ambos os classificadores, evidenciou-se que em geral não há perda significativa de informação quando não se utiliza todos os canais de polarização, porém, desde que a polarização dual HH+HV esteja presente.

A análise de apenas um canal mostrou que polarizações univariadas possuem limitações na discriminação de incrementos de desflorestamento. Quando se realizou a segmentação pelo SPRING, os resultados apontaram a limitação do canal HH para detecção de desflorestamentos recentes, apresentando simultaneamente o maior erro de omissão e inclusão em comparação com as outras classificações. Individualmente, a polarização HV apresentou resultados melhores em comparação com os canais HH e VV, indicando que o canal HV discrimina melhor floresta de incremento de desflorestamento. No entanto, a utilização de apenas um canal não obteve acerto de classificação tão elevado quanto à combinação dual HH+HV, a qual apresentou perda de informação menor.

Embora a segmentação pelo SEGSAR tenha um tempo de processamento superior em relação à segmentação do SPRING, evidenciou-se que os erros de omissão foram menores quando se utilizou tal segmentador (E.O. de 7,17% para o dual HH+HV). No entanto, o erro de inclusão foi de 75,41%, valor superior em relação à classificação de maior *kappa* (E.I. de 54,06%). Deste modo, constatou-se que a segmentação através do SPRING possui maior *kappa* devido ao menor erro de inclusão, no entanto o erro de omissão é maior em relação à segmentação pelo SEGSAR, o qual apresenta maior erro de inclusão em relação ao SPRING. Porém, a análise dos erros de inclusão permitiu inferir que um considerável número de polígonos classificados como erros de inclusão no SEGSAR foram detectados pelo PRODES do ano

seguinte (2007), seja porque estavam sob nuvens no ano anterior ou realmente devido ao erro de omissão do PRODES.

Assim, comprovou-se a eficácia da utilização de dados radar na detecção de desflorestamentos, principalmente em relação à detecção de incrementos de desflorestamento sob nuvens em florestas tropicais, onde verificou-se que os dados ALOS/PALSAR podem ser complementares aos dados obtidos pela imagens ópticas do PRODES.

Por fim, pode-se inferir que o par de amplitudes HH+HV na maioria dos casos é suficiente para separar as classes incremento de desflorestamento e floresta com boa acurácia, o que justifica a disponibilidade dos dados FBD do modo de imageamento operacional do sensor ALOS/PALSAR para aplicações em estudos de cobertura do solo em floresta tropical.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUD NETA, S. R. **Uso de imagens ALOS/PALSAR multipolarizadas para detecção de incremento de desflorestamento na Amazônia**. 2009. 264 p. (INPE-16624-TDI/1598). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009.
- ABOUD NETA, S. R.; DUTRA, L. V.; SCOFIELD, G. B.; NEGRI, R. G.; FREITAS, C. C.; SILVA, D. L. A. Comparação entre classificação contextual e classificação por regiões para mapeamento de uso e cobertura da terra na região da Floresta Nacional de Tapajós - PA (FLONA): utilizando imagens polarimétricas em banda L. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7749-7756.
- ALENCAR, A.; NEPSTAD, N.; MCGRATH, D.; MOUTINHO, A.; PACHECO, P.; DIAZ, M.D.C.V.; FILHO, B. S. **Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica**. Manaus, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Ipam), 2004, p. 89
- ALVES, D. S. The Stability of Tropical Rainforest Margins, Linking Ecological, Economic and Social Constraints of Land Use and Conservation. **Verlag - Berlin: Springer, 2007. 493-512 p. 19**
- ASNER, G.P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, preview article, p. 1-8, 2001.
- CAMARA, G.; VALERIANO, D. D. M.; SOARES, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1996, 22 p.
- COHENCA, D. Evolução anual de desmatamentos na Floresta Nacional do Tapajós de 1997 a 2005. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6653-6660. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 137 p
- CORREIA, A. H. **Desenvolvimento de Classificadores de Máxima Verossimilhança e ICM para Imagens SAR Polarimétricas**. 275 p. Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.
- DUTRA, L. V.; HUBER, R. Feature Extraction and Selection for ERS-1/2 InSAR Classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n.5, p. 993- 1016. May 1999.
- DUTRA, L. V.; SCOFIELD, G. B. ; ABOUD NETA, S. R. ; NEGRI, R. G. ; FREITAS, C. C. ; MURA, J. C. ; SANT'ANNA, S. J. S. ; GAMA, F. F. Alos PALSAR polarimetric data for land use/land cover classification in Amazon. In: First Joint PI Symposium of Alos Data Nodes for Alos Science Program, 2007, Kyoto. First Joint PI Symposium of Alos Data Nodes for Alos Science Program. Kyoto : Jaxa- Japan Aerospace Exploration Agency, **Proceedings...** 2007.
- DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C.; SCOFIELD, G. B.; ABOUD NETA, S. R.; NEGRI, R. G.; SANTOS, J. R.; SANT'ANNA, S. J. S. Assessment on the improvement of the land use/land cover classification in amazon using alos palsar polarimetric data. In: IGARSS, 2008, Boston. **Proceedings...** 2008.
- FEARNSIDE, P.M. **A floresta Amazônia nas mudanças globais**. Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa), 2003, 134 p.
- FRERY, A.C. **Some statistical tools for synthetic aperture radar image synthesis, processing and analysis**. (Doctoral Thesis) – INPE, São Jose dos Campos. 1993.
- GLENDAY, J. Carbon storage and emissions offset potential in na East African tropical rainforest. **Forest Ecology and Management**, v. 235, p. 72-83, 2006.
- GONÇALVES, F. D. **Utilização de dados de Sensores Remotos para o Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo na Baía de Guajará**, Belém-PA. 2005. 162f. Dissertação (Mestrado em Ciências área de Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2005.

- GUERRA, J. B. **Avaliação do Potencial de Dados SAR R99B para Discriminar Incremento de Desflorestamento na Amazônia.** 127 p. Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.
- HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53,n.4,p.421-422, 1987.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites. Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e QUEIMADAS 2007-2008.** São José dos Campos-SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008, 47 p.
- KERR, J.T.; OSTROVSKY, M. From space to species: ecological applications for remote sensing. **Trends in Ecology and Evolution**. v. 18, n. 6, p. 299-305, 2003.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurements of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.
- MALHI, Y; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A., KILLEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 169, p. 169-172, 2008.
- PARADELLA, W.R.; OLIVEIRA, C.G.; LUIZ, S.; CECARELLI, I.C.F.; COTTINI, C.P.; OKIDA, R. Operational use of RADARSAT-1 fine stereoscopy integrated with Landsat-5 thematic mapper data for cartographic application in the Brazilian Amazon. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Vol. 31, nº 2, p. 139-148. 2005.
- PRODES. **Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia.** Fevereiro 2009. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>.
- RICHARDS, J.A., **Remote Sensing Digital Image Analysis: a introduction**, 2 ed., Springer-Verlag, Germany, 1995.
- RIGNOT, E.; SALAS, W. A.; SKOLE, D. L. Mapping deforestation and secondary growth in Rondônia, Brazil, using imaging radar and thematic mapper data. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n.2, p. 167-179, 1997.
- ROSENQVIST, A.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSON, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environment Science & Policy**, v. 6, n. 5, p. 441-455, out. 2003.
- SHIMABUKURO, Y.E.; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C.; DUARTE, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra no modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia.** São José dos Campos: INPE, 1997. 16p. (INPE – 6147-PUD/029)
- SOUZA JR, M.A., **Segmentação multi-níveis e multi-modelos para imagens de radar e ópticas.** Tese Doutorado em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.
- STORY, M.; CONGALTON, R.G. Accuracy assessment: a user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 397-399, 1986.
- ULABY, F.T.; MORE, R.K.; FUNK, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive.** Reading, Addison-Wesley, 1986. v.2. 360p.
- VENTURIERI, A. **Zoneamento Ecológico-Econômico da Área de Anuência da Rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém): Diagnóstico do Meio Socioeconômico, Jurídico e Arqueologia.** [S.l.]: Bel_em: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 229-252 p.
- VIEIRA, P. R., **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR.** São José dos Campos, 251 p. (INPE 6124-TDI/585). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.