

Detecção da mortalidade de bambus em florestas do sudoeste amazônico usando dados MODIS (MAIAC)

Ricardo Dalagnol¹
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão¹
Lênio Soares Galvão¹
Yhasmin Mendes de Moura¹
Camila Valéria de Jesus Silva^{1,2}

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{ricardo.silva, lenio.galvao}@inpe.br, laragao@dsr.inpe.br, yhas.mendes@gmail.com

² Lancaster Environment Centre, Lancaster University
Lancaster LA1 4YQ, United Kingdom
c.silva@lancaster.ac.uk

Abstract. The southwest Amazon forests are dominated of bamboo species of the genus *Guadua* and cover about 161,500 km². These individuals have a life cycle of about 28 years and present only one reproductive event followed by their death. This process accumulates dry biomass in the forest and increases the probability of fire occurrence. Since extreme drought events increase fire vulnerability, and this region has been affected by some of these events in the last decades, it is possible that bamboos are related to a higher occurrence of forest fires. In this sense, the objective of the present study was to evaluate the detection of bamboo mortality in southwest Amazon forests using MODIS (MAIAC) data, spectral mixture modeling and CART decision tree. The combined use of band 5 (medium infrared) and GV fraction allowed the detection of bamboo mortality with 56% accuracy. The bamboo life stages can be differentiated because of different spectral patterns, especially on the near and medium infrared wavelengths, and distinct intra-annual seasonality patterns from non-bamboo forest. It was possible to map the bamboo-dominated forests, including bamboo life stages, and non-bamboo-dominated forests with 76% accuracy. The mortality detected in this study may have been influenced by the occurrence of fire.

Palavras-chave: bambu, mortalidade, árvore de decisão, MODIS, MAIAC, bamboo, mortality, decision tree.

1. Introdução

O sudoeste amazônico é ocupado por vegetações do tipo floresta ombrófila aberta com dominância de espécies de bambu do gênero *Guadua*, chamado de agora em diante apenas de “bambu”. Essas florestas dominadas por bambu (FDB) ocupam uma extensão de 161.500 km² e apresentam padrões espectrais, espaciais e temporais, em imagens de satélite, distintos de outras florestas amazônicas (Carvalho et al., 2013). O bambu apresenta o mecanismo de semelparidade, que implica em apenas um período reprodutivo durante a vida seguido de mortalidade, conferindo mudanças abruptas nos padrões espectrais das imagens de sensoriamento remoto. Estudos apontam que o ciclo de vida do bambu nessa região é em torno de 28 anos, e que sua floração e morte subsequente ocorrem de forma sincronizada em grandes populações (Carvalho et al., 2013). Esse processo causa um acúmulo de biomassa seca na floresta e, conseqüentemente, aumenta a probabilidade de ocorrência do fogo (Keeley e Bond, 1999).

A distribuição das FDB está associada a fatores edáficos como a presença de solos ricos em argilas expansíveis, pobremente drenados, do tipo Cambissolo e Luvisolo (Carvalho et al., 2013). Algumas hipóteses assumem que a perpetuação do bambu na floresta e sua invasão sobre áreas não dominadas são favorecidas pelas queimadas. Isto ocorre pelo aumento da entrada de luz no interior do dossel após o fogo, pela diminuição na competição por água e nutrientes no solo e pela grande resiliência dos indivíduos às queimadas (Smith e Nelson, 2011; McMichael

et al., 2013). Uma vez dentro da floresta, o bambu pode, por si próprio, causar distúrbios suficientes nos indivíduos arbóreos para manter sua alta densidade (Griscom e Ashton, 2006).

Tendo em vista que eventos extremos de seca aumentam a vulnerabilidade às queimadas e que a região sudoeste amazônica tem sido epicentro de eventos de seca extrema, como em 2005 e 2010 (Aragão et al., 2007; Lewis et al., 2011), acredita-se que a dominância dos bambus nas florestas do sudoeste da Amazônia possa estar associada a uma maior ocorrência de queimadas.

Nesse sentido, o objetivo do presente estudo é avaliar a detecção da mortalidade de bambus em florestas do sudoeste amazônico usando dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), processados pelo *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction Algorithm* (MAIAC), modelagem de mistura espectral e árvore de decisão CART.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado sobre as FDB do Sudoeste da Amazônia (Figura 1). Essas florestas ocorrem no Peru e nos estados do Acre e Amazonas no Brasil. A cobertura da terra da região é predominantemente de vegetação do tipo Floresta Ombrófila Aberta, com ocorrência em menor proporção de outras classes de uso e cobertura da terra como áreas urbanas e agricultura, principalmente na região leste da imagem próximo a Rio Branco-AC, e ao longo das estradas e rios.

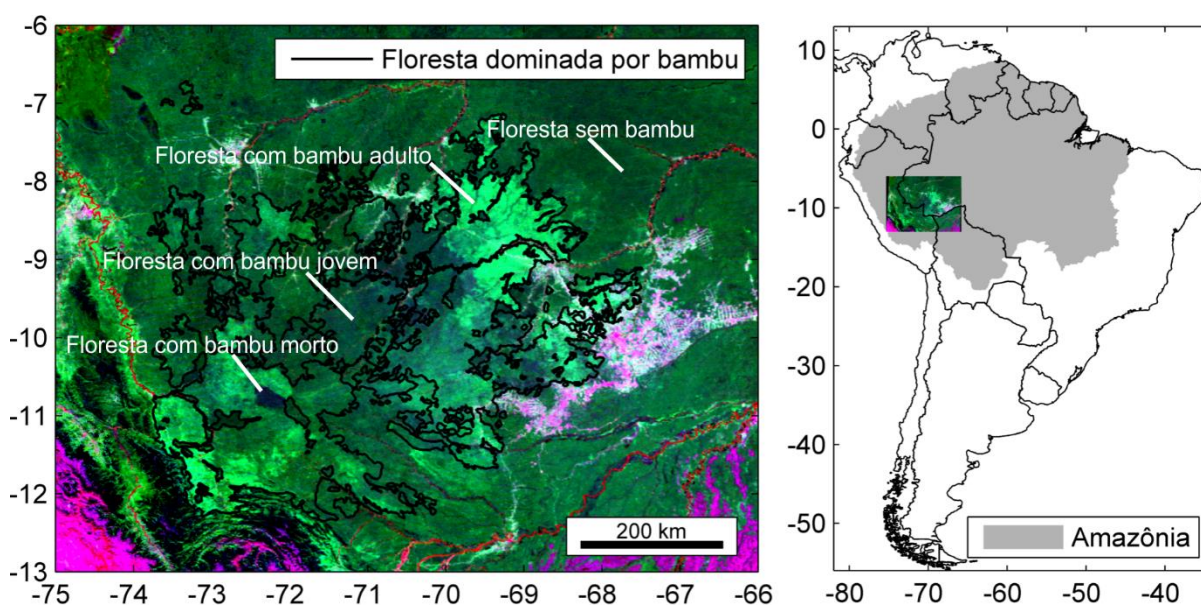


Figura 1. Florestas dominadas por bambu (FDB) no sudoeste amazônico (4 de agosto de 2013) em composição RGB com as bandas 1 (0,65 μm), 2 (0,86 μm) e 6 (1,64 μm) do MODIS (MAIAC). O perímetro de distribuição do bambu delimitado por fotointerpretação de imagens Landsat está indicado (Carvalho et al., 2013).

2.2 Dados e pré-processamento

Foram adquiridos dados de reflectância de superfície do MODIS (MAIAC) (Lyapustin et al., 2011) para o período de janeiro de 2000 a julho de 2014. As composições são de 16 dias, com tamanho de pixel de 1000 m, incluindo sete bandas espectrais: 1 (620–670 nm), 2 (841–876 nm), 3 (459–479 nm), 4 (545–565 nm), 5 (1230–1250 nm), 6 (1628–1652 nm) e 7 (2105–2155 nm). Aplicou-se modelagem linear de mistura espectral (MLME) para decompor o sinal dos pixels em frações *green vegetation* (GV), *non-photosynthetic vegetation* (NPV) e *shade* (SHADE). A seleção de *endmembers* foi realizada a partir do algoritmo SISAL (Bioucas-Dias,

2009), o qual localiza o *simplex* de mínimo volume de uma imagem determinando os extremos da distribuição através de multiplicadores de Lagrange. A decomposição dos pixels foi realizada utilizando os *endmembers* selecionados anteriormente e a técnica SUNSAL (Bioucas-Dias e Figueiredo, 2010).

A fim de minimizar as variações causadas por nuvens, aerossóis e por variações angulares do Sol e do sensor, foram selecionadas uma imagem por ano na estação seca no trimestre julho-setembro: 12-ago-2000, 31-jul-2001, 19-ago-2002, 23-set-2003, 24-ago-2004, 28-ago-2005, 31-ago-2006, 02-ago-2007, 04-ago-2008, 08-ago-2009, 27-ago-2010, 14-ago-2011, 16-ago-2012, 04-ago-2013 e 06-jul-2014.

2.3 Amostragem

Com base no trabalho de Carvalho et al. (2013), analisou-se visualmente o conjunto selecionado de imagens (2000 a 2014) para identificar áreas sem bambu e áreas com diferentes estádios de desenvolvimento de bambu, compondo as seguintes classes:

- Floresta sem bambu: floresta sem dominância de bambu;
- Floresta com bambu jovem (FDB Jovem): floresta com dominância de bambu em estágio inicial/intermediário de regeneração que ocorre após ciclo de mortalidade;
- Floresta com bambu adulto (FDB Adulto): floresta com dominância de bambu em estágio avançado de regeneração que ocorre após o estágio jovem;
- Floresta com bambu morto (FDB Morto): floresta com dominância de bambu morto/seco que ocorre após estágio adulto.

Cada área contígua de FDB Morto identificada foi considerada como uma população de bambu, onde se demarcou cinco coordenadas geográficas na imagem. Também foi demarcado um número similar de amostras para as demais classes. A classe floresta sem bambu foi amostrada principalmente nas regiões norte e leste da imagem (Figura 1), que não apresentam dominância por bambu. A classe FDB Adulto foi amostrada principalmente na região central da imagem onde ocorre uma mancha grande de bambu adulto (Figura 1), que pode ser observada em toda a série MODIS (MAIAC). A classe FDB Jovem foi amostrada sobre algumas áreas de FDB Morto onde não ocorreram novos eventos de mortalidade posteriores. Essas amostras de FDB Jovem foram coletadas das imagens dos anos subsequentes à morte do bambu. Por fim, foi realizada a extração dos dados das imagens anuais MODIS (MAIAC) de acordo com as coordenadas coletadas, gerando-se um conjunto amostral multi-temporal.

2.4 Análise

Para explorar a diferenciação entre classes, foram gerados gráficos da reflectância espectral de cada classe e de dispersão entre frações de mistura. Também foram gerados perfis temporais da reflectância das bandas MODIS (MAIAC) e da fração de mistura sobre manchas de bambu para comparar o sinal da floresta com e sem bambu e identificar eventos de mortalidade. Para melhorar a visualização foram removidos os *outliers* pelos quantis em 1 e 99%. Os sinais foram avaliados qualitativamente. Em seguida, aplicou-se o método de árvore de decisão *Classification And Regression Tree* (CART) (Breiman et al., 1984) para obter critérios estatisticamente consistentes para a separação de classes. O CART classifica um conjunto de amostras de acordo com a separabilidade estatística de seus atributos e classes delimitadas *a priori*, gerando uma árvore binária de decisão com vários nós. Tem vantagens por ser não paramétrico, não requerer seleção prévia de variáveis, ser invariante a transformações nas variáveis dependentes, e por tratar *outliers* eficientemente. As bandas MODIS (MAIAC) de 1 a 7 e as frações de mistura espectral GV, NPV e SHADE foram utilizadas como atributos no método. A árvore de decisão foi gerada utilizando 60% das amostras coletadas. As demais amostras (40%) foram utilizadas para uma validação cruzada independente. Sobre os resultados foram calculados a matriz de confusão e métricas de exatidão global, índice kappa, erros de

omissão (EO), erros de comissão (EC) e exatidão da classe (ECI). Também foi calculada a significância estatística do índice kappa para verificar se essa classificação foi diferente de uma classificação aleatória. Após a validação, aplicou-se a árvore sobre as imagens para gerar mapas temáticos para visualização da distribuição dos estádios de vida das florestas dominadas por bambu.

3. Resultados e Discussão

Todas as classes apresentaram uma resposta espectral similar a esperada em vegetações de florestas ombrófilas (Figura 2A). No entanto, observaram-se algumas diferenças entre as classes. A classe FDB Adulto apresentou sinal superior às demais classes, principalmente nas bandas 2 e 5, possivelmente relacionado a uma maior densidade de indivíduos de bambu no estágio adulto. Os sinais de FDB Jovem e Floresta sem bambu foram os mais similares dentre as classes. Essa similaridade possivelmente ocorre porque os indivíduos de bambu estão em estágio de regeneração e não alcançaram o dossel da floresta, portanto assemelham-se a uma floresta sem bambu. O sinal de FDB Morto apresenta resposta similar a FDB Jovem e Floresta sem bambu, porém, tem sinal sutilmente menor na banda 2, e um sinal intermediário entre essas duas classes e FDB Adulto na banda 6. O atributo GV apresentou uma amplitude de 30 a 60% com um gradiente crescente partindo de FDB Morto, FDB Jovem, Floresta sem bambu, até FDB Adulto (Figura 2B). Já o atributo NPV apresentou amplitude de 0 a 25%, onde a maior parte dos pixels concentraram-se de 0 a 20% NPV, com certa diferenciação para a classe FDB Morto, que apresentou distribuição de 10 a 30% NPV. A classe FDB Adulto apresentou alta resposta em GV, condizente com uma possível alta densidade de indivíduos em estado fotossinteticamente ativo, enquanto que a classe FDB Morto apresentou baixo GV e alto NPV, condizente com um maior conteúdo de biomassa morta e estado fotossinteticamente inferior as demais classes. Outro estudo da literatura encontrou uma assinatura espectral similar a encontrada no presente estudo, corroborando com os pontos mencionados (Carvalho et al., 2013).

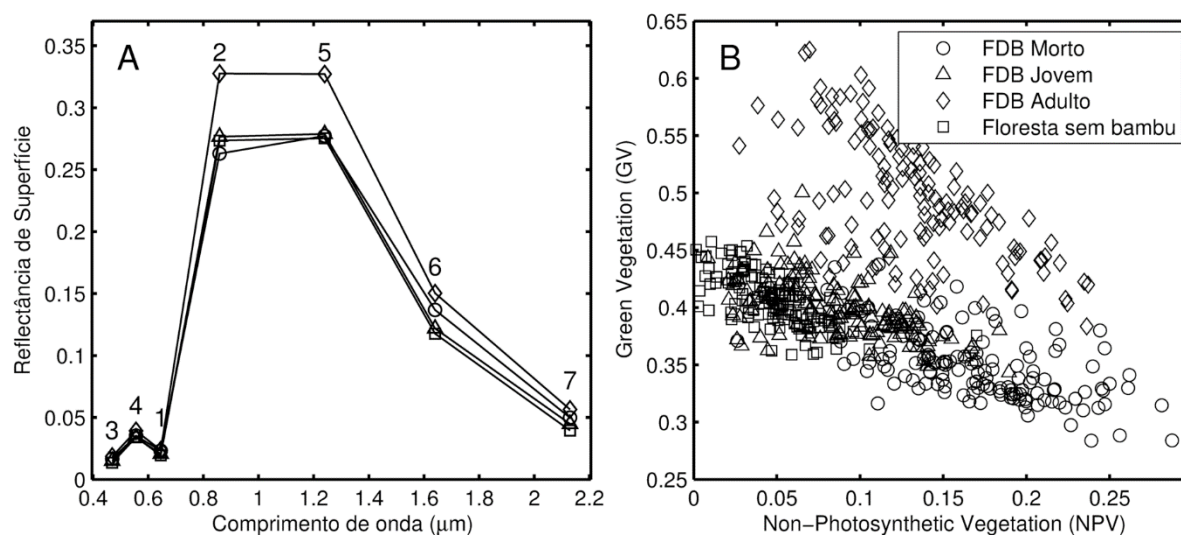


Figura 2. Representação dos estádios de vida das florestas dominadas por bambu: (A) assinatura espectral média das amostras com número das bandas MODIS (MAIAC); (B) dispersão das amostras entre *green vegetation* (GV) e *non-photosynthetic vegetation* (NPV).

Os perfis espectro-temporais apresentaram diferenças na intensidade do sinal entre a floresta com e sem bambu, incluindo o ano da mortalidade entre 2010 e 2011 (Figura 3). Observou-se que magnitude do sinal da FDB é, em geral, superior ao da Floresta sem bambu na maior parte das bandas e frações, sendo inferior somente na fração SHADE. Isso ocorre

possivelmente devido a uma maior densidade de indivíduos nas áreas de bambu, como mencionado anteriormente. Observou-se que a FDB parece apresentar variação sazonal inter-anual mais ampla do que a floresta sem bambu nas bandas 2, 3, 5, 7, NPV e GV (Figura 3). Essa variação sazonal pode estar relacionada a perda de folhas das árvores associadas ao bambu na estação seca, que são quase totalmente decíduas, e ao estresse hídrico associado ao tipo de solo, e não necessariamente relacionadas ao bambu, pois o mesmo não perde suas folhas na estação seca (Nelson e Bianchini, 2005). Entre 2010 e 2011, no ano da mortalidade da mancha de FDB, observaram-se variações abruptas em GV e NPV. Próximo da data da mortalidade, o bambu apresentou aumento do NPV e diminuição do GV. Esse comportamento está de acordo com o que é esperado em campo, onde os indivíduos de bambu ficam muito secos após a morte. Após um ano da mortalidade, a FDB apresentou sinal similar aos anos anteriores. Acredita-se que o bambu possa ter entrado em estado de regeneração.

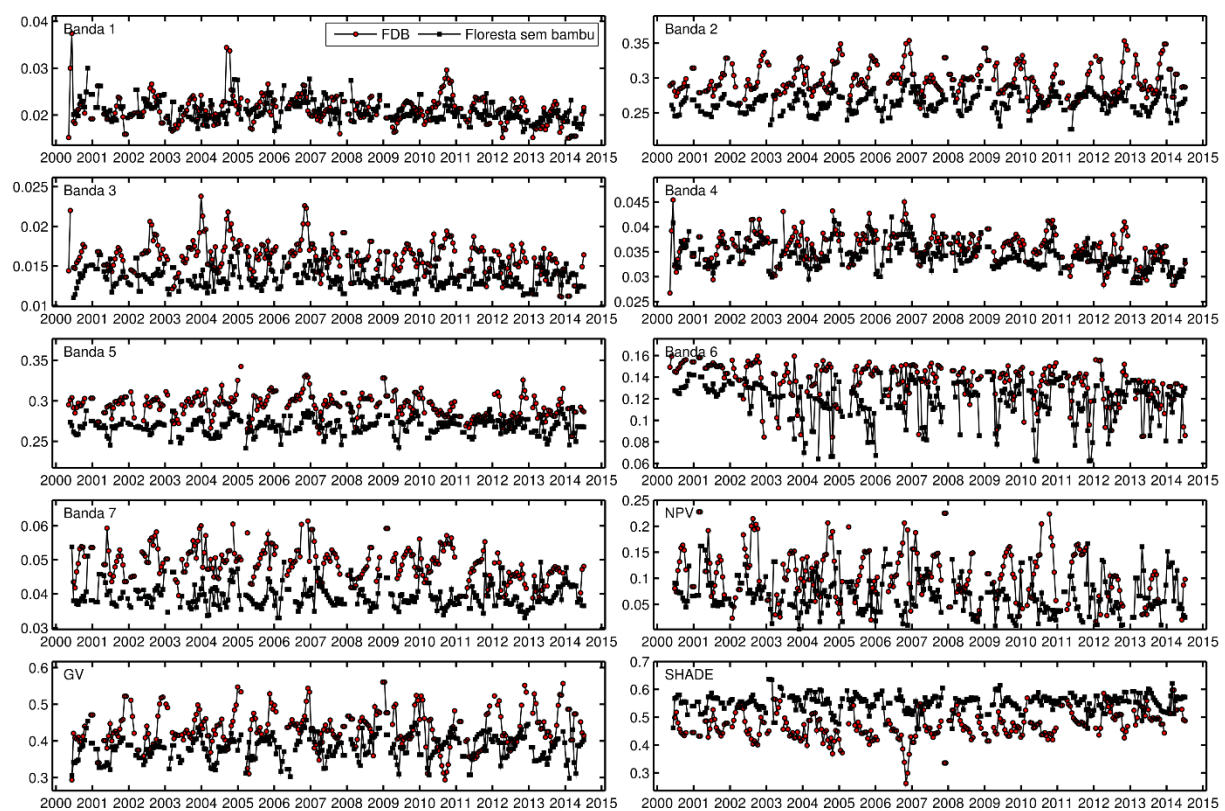


Figura 3. Perfis espectro-temporais para uma área de FDB com mortalidade entre 2010 e 2011, e uma área de floresta sem bambu, em cada banda MODIS (MAIAC) e frações de mistura espectral. As trajetórias apresentam algumas falhas devido remoção de *outliers*.

A árvore de decisão gerada pelo método CART apontou que os atributos 5, 7, e GV foram os que apresentaram melhor desempenho no mapeamento das florestas dominadas por bambu, com separação por estágio de vida e detecção da mortalidade (Figura 4A). Observou-se que na separação estatísticas dos dados, a detecção do FDB Morto foi relacionada a um baixo sinal na banda 5 e baixo sinal de GV (Figura 5A). Um alto sinal na banda 5 foi associado a pixels de FDB Adulto, como discutido anteriormente na análise da resposta espectral média (Figura 2A). Já um baixo sinal de GV foi associado a FDB Morto, enquanto um alto sinal foi associado a FDB Jovem e Floresta sem bambu. Essas duas classes remanescentes foram separadas utilizando a banda 7.

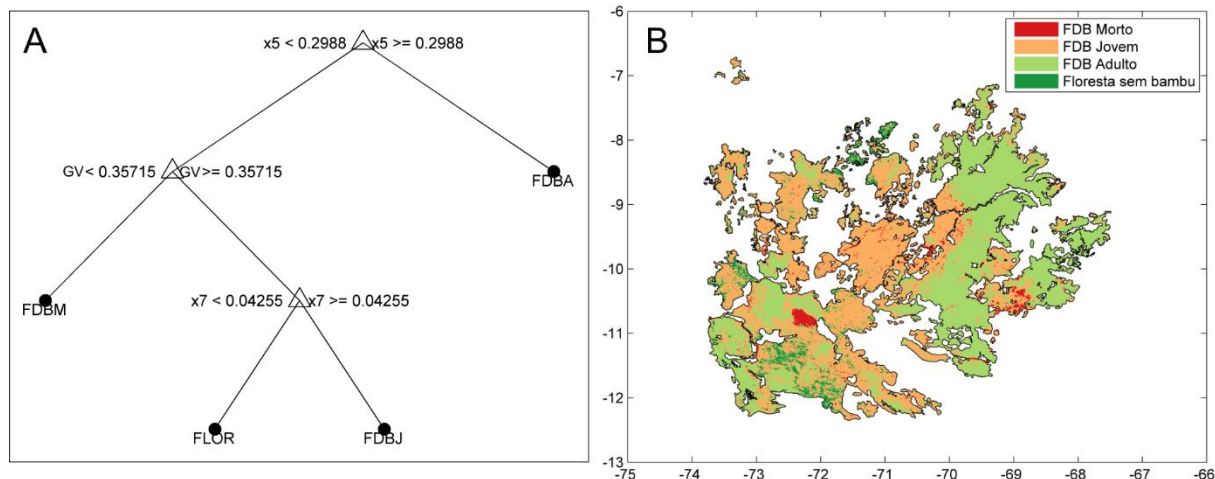


Figura 4. (A) Árvore de decisão gerada pelo método CART de acordo com as classes Floresta sem bambu (FLOR), FDB Jovem (FDBJ), FDB Adulto (FDBA) e FDB Morto (FDBM); (B) Exemplo de mapa temático das florestas dominadas por bambu e sem bambu em 04-Aug-2013.

A validação apontou que a exatidão global foi satisfatória entre todas as classes ($EG = 76,67\%$) e diferente de aleatório ($Kappa = 0,69$ e $p = 0,000$) (Tabela 1). A classe FDB Morto apresentou 56% de exatidão, sendo que seu erro foi proveniente principalmente da confusão com a classe FDB Jovem, onde foram alocados pixels de FDB Morto como FDB Jovem. Essa confusão era esperada, pois a classe FDB Jovem ocorre após a morte do bambu, porém esses erros podem ter sido provenientes de erros na alocação das amostras de FDB Morto devido a escala de mapeamento ter sido anual. É possível que tenham sido atribuídas à algumas amostras a classe FDB Morto quando na verdade essas áreas já estavam em processo de regeneração pós-mortalidade. Portanto, deveriam ter sido FDB Jovem.

Tabela 1. Matriz de confusão para validação da classificação das FDB.

Classes	FDB Morto	FDB Jovem	FDB Adulto	Floresta	Total	EC (%)
FDB Morto	57	29	4	4	94	39,36
FDB Jovem	3	78	1	18	100	22,00
FDB Adulto	1	18	78	1	98	20,41
Floresta	3	9	0	86	98	12,24
Total	64	134	83	109	390	
EO (%)	10,94	41,79	6,02	21,10		EG (%) = 76,67
ECl (%)	56,44	50,00	75,73	71,07		Kappa = 0,69*

* = significativo com 1% de nível de significância; EC = Erro de Comissão; EO = Erro de Omissão; ECl = Exatidão de classe; EG = Exatidão Global.

Apesar da alta confusão entre FDB Morto e FDB Jovem, o mapa temático gerado apresentou boa similaridade com o que pode ser observado visualmente nas imagens MODIS (MAIAC), principalmente com relação às classes FDB Adulto e Morto (Figura 4B e Figura 1). No entanto, ao analisar a série de mapas temáticos anuais, observou-se algumas inconsistências em comparação com suas respectivas composições de bandas MODIS (MAIAC), como: mudança de FDB Adulto para Jovem sem passar por FDB Morto, e mortalidade recorrente em algumas áreas. É possível que estas áreas tenham apresentado a mortalidade num período intra-anual e iniciado processo de regeneração antes da realização do próximo mapeamento. Com relação as áreas de mortalidade recorrente, é possível que efeito de fogo seja o responsável pela mortalidade, ao invés do ciclo natural do bambu.

4. Conclusões

Nesse estudo investigou-se a detecção da mortalidade de bambus em florestas do sudoeste amazônico através de imagens MODIS (MAIAC), modelagem de mistura espectral e árvore de decisão CART. A banda 5 (infravermelho médio) e fração GV possibilitaram a detecção da mortalidade de bambus com uma exatidão de cerca de 56%. Os estádios de vida do bambu possuem padrões de cobertura passíveis de serem diferenciados devido a diferenças espectrais, principalmente nos comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio, e padrões temporais de sazonalidade intra-anuais diferenciados da floresta sem bambu. Um mapeamento das florestas dominadas por bambu e sem bambu pode ser realizado com exatidão na ordem de 76%. A mortalidade detectada nesse estudo pode ter sido influenciada por ocorrência de queimadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro, processo nº 2015/22987-7.

Referências

- Aragão, L. E. O. C.; Malhi, Y.; Roman-Cuesta, R. M.; Saatchi, S.; Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophys. Res. Lett.**, v.34, L07701, 2007. doi:10.1029/2006GL028946.
- Bioucas-Dias, J. A variable splitting augmented Lagrangian approach to linear spectral unmixing. In: **First IEEE GRSS Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing-WHISPERS'2009**, Grenoble, France, 2009.
- Bioucas-Dias, J.; Figueiredo, M. Alternating direction algorithms for constrained sparse regression: Application to hyperspectral unmixing. In: **2nd IEEE GRSS Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing-WHISPERS'2010**, Reykjavik, Iceland, 2010.
- Breiman, L.; Friedman, J. H.; Olshen, R. A.; Stone, C. J. **Classification and regression trees**. Monterey, CA: Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1984. ISBN 978-0-412-04841-8.
- Carvalho, A.L.; Nelson, B.W.; Bianchini, M.C.; Plagnol, D.; Kuplich, T.M. Bamboo-Dominated Forests of the Southwest Amazon: Detection, Spatial Extent, Life Cycle Length and Flowering Waves. **PLoS ONE**, v.8, n.1, e54852, 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0054852
- Griscom, B.; Daly, D.; Ashton, M. Floristics of bamboo-dominated stands in lowland forests of SW Amazonia. **Bull. Torrey Botanical Society**, v.134, n.1, 2007.
- Keeley, J. E.; Bond, W. J. Mast flowering and semelparity in bamboos: The bamboo fire cycle hypothesis. **American Naturalist**, v. 154, p. 383-391, 1999.
- Lewis, S. L.; Brando, P. M.; Phillips, O. L.; Van Der Heijden, G. M. F.; Nepstad, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, v.331, p.554, 2011.
- Lyapustin, A.; Wang, Y.; Laszlo, I.; Kahn, R.; Korokin, S.; Remer, L.; Levy, R.; Reid, J.S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, 116, D03211, 2011.
- McMichael, C. H.; Bush, M. B.; Silman, M. R.; Piperno, D. R.; Raczka, M.; Lobato, L. C.; Zimmerman, M.; Hagen, S.; Palace, M. Historical fire and bamboo dynamics in western Amazonia. **J. Biogeogr.**, v.40, p.299-309, 2013. doi:10.1111/jbi.12002
- Nelson, B.W.; Bianchini, M.C. Complete life cycle of southwest Amazon bamboos (*Guadua* spp) detected with orbital optical sensors. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, p.16-21, 2005.
- Smith, M.; Nelson, B.W. Fire favours expansion of bamboo-dominated forests in the south-west Amazon. **Journal of Tropical Ecology**, v.27, n.1, p. 59-64, 2010. doi: 10.1017/S026646741000057X.