

Discriminação da Castanheira (*Bertholletia excelsa*) com Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros-finais aplicada a dados multiespectrais WorldView-2

Cibele Hummel Amaral¹
José Marinaldo Gleriani¹
Haron Abraham Magalhães Xaud²
Luciano Shozo Shiratsuchi³
Kátia Emidio da Silva⁴

¹Universidade Federal de Viçosa - UFV/DEF
36570-900 - Viçosa - MG, Brasil
{chamaral, gleriani}@ufv.br

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA/Roraima
Caixa Postal 133 - 69301-970-Boa Vista - RR, Brasil
haron.xaud@embrapa.br

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/Agrossilvipastoril
Caixa Postal 343 – 78550-970 – Sinop - MT, Brasil
luciano.shiratsuchi@embrapa.br

⁴Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/Amazônia Ocidental
Caixa Postal 319 - 69011-970 – Manaus - AM, Brasil
katia.emidio@embrapa.br

Abstract. *Bertholletia excelsa* is one of the most important species of Amazon. Its nut has a particular economic, social and environmental importance for the Brazil northern region, since it is one of the main product of exportation and the unique non-timber product completely extract from native forests by traditional communities. The aim of this research is to test the use of Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis on high-spatial-resolution multispectral image from WorldView 2 sensor, in order to map the *Bertholletia excelsa* fraction, in a per-pixel basis, in Tefé, state of Amazonas, Brazil. The image had its continuum removed, and methods for endmember selection, as EAR-MASA-CoB (EMC) and Iterative Endmember Selection (IES), were tested. Fraction thresholds were also tested. By using field samples and pan-sharpening regions of interest were selected on the *Bertholletia excelsa* and other vegetation type's crowns. They were randomly divided into training and validation samples. The best result was obtained on the continuum removed image, using endmembers selected through EMC, with fraction threshold between $-0,01$ and $1,01$, and $RMSE \leq 0,025$. When defined a threshold of 56% for *Bertholletia excelsa* fraction, 65% of its validation crowns were rightly classified and 9,5% of the validation crowns from other vegetation types were erroneously classified. This result shows the good performance of the visible-near infrared data for mapping and discussing the spatial distribution of the target species.

Palavras-chave: high-spatial-resolution, spectral mixture analysis, species mapping, alta resolução espacial, análise de mistura espectral, mapeamento de espécie.

1. Introdução

A Castanheira ou Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bompl.) é uma das espécies mais importantes da Amazônia, uma vez que tem potencial para uso múltiplo e sua castanha é um dos principais produtos de exportação da região (Souza et al., 2008). Contudo, mesmo com grande importância ambiental e social, ainda persiste um baixo nível tecnológico na exploração da espécie. Considerando a extensão territorial e as particularidades da região Norte do Brasil, as práticas de manejo podem ser melhoradas, desde que se conheça a distribuição espacial e os ambientes preferenciais de ocorrência da espécie. Neste contexto, a visão sinótica proporcionada por sensores aerotransportados e orbitais, associados à copa

dominante da espécie é um grande passo para alcançar os objetivos acima descritos. O mapeamento de uso e cobertura do solo teve nos sensores fotográficos aerotransportados o pioneirismo (sensor/plataforma) (Lillesand e Kieffer, 1994; Avery e Berlin, 1992), a identificação de espécies florestais não foi diferente, Myers e Benson (1981) com aerofotos 1:2000, Trichon (2001) com fotos 1:600, e Gonzáles-Orozco et al. (2010) com pixels de ~20 cm, descrevem sucesso de identificação de espécies, com auxílio ou não de chaves de interpretação.

No entanto, a fotointerpretação é sempre limitada pela morosidade de identificação e/ou baixa abrangência devido a grande escala; o uso de sensores digitais e a automação da análise removem a subjetividade da análise humana (Clark et al., 2005). Os mesmos autores descrevem que 30 canais situados principalmente nas regiões espectrais visível e infravermelho de ondas curtas são os mais promissores na discriminação de espécies arbóreas emergentes em floresta tropical na Costa Rica. Utilizando dados hiperespectrais aerotransportados e diferentes técnicas automáticas de mapeamento, Amaral et al. (2015) e Ferreira et al. (2016) também observaram a importância das bandas do infravermelho de ondas curtas no mapeamento de espécies (invasoras e nativas, respectivamente) nos domínios de Cerrado e Mata Atlântica, no sudeste do Brasil. Contudo, Ferreira et al. (2016) reportam exatidões globais superiores a 70% na classificação de espécies arbóreas em fragmento de floresta estacional semidecidual (Mata Atlântica), utilizando apenas dados das regiões espectrais visível e infravermelho próximo (VNIR). Com o uso de dados orbitais WorldView-2, com oito bandas VNIR, Immitzer et al. (2012) mostram que o sucesso de classificação de dez espécies em floresta temperada na Austria é dependente da espécie. Os autores observam que as bandas inovadoras do sensor, como o azul extremo, amarelo, *red-edge* e infravermelho próximo 2, tiveram baixo impacto na discriminação das quatro principais espécies. No entanto, relatam que o uso de todas as oito bandas do sensor aumentam significativamente a exatidão dos resultados quando mais espécies são incluídas na classificação.

Nesse sentido, o teste de técnicas robustas de processamento digital de imagens, que utilizem o conjunto de bandas VNIR do sensor de alta resolução espacial WorldView-2, mostra-se necessário, a fim de se explorar a potencialidade desse sensor para mapeamentos automatizados de espécies arbóreas em paisagens altamente biodiversas, como a Amazônia. Embora os dados WorldView-2 sejam de alta resolução espacial, a mistura espectral não diminui com a redução do tamanho do pixel; componentes, antes desprezadas, assumem importância em fração nos pixels (Keshava e Mustard, 2002).

A Análise de Mistura Espectral (SMA) é um método de modelagem baseada em pixel, onde os espectros de uma imagem são modelados como uma combinação linear de espectros “puros” (membros-finais) e sua proporção relativa é determinada dentro de cada pixel da imagem (Adams et al., 1993). A Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros-finais (MESMA; Roberts et al., 1998) é a técnica SMA mais amplamente utilizada e de maior sucesso na literatura (Somers et al., 2011). Ela apresenta uma maior perspectiva de sucesso no mapeamento de espécies florestais, pois permite que o número e o tipo de membros-finais variem por classe nas modelagens pixel a pixel (Roberts et al., 1998). As variações intraespecíficas – associadas às diferenças estruturais e bioquímicas individuais, que podem ser realçadas em dados de alta resolução espacial – são incorporadas pelas classes de estudo. Assim, MESMA mostra-se adequada para análises interespecíficas de mistura espectral pixel a pixel, quando utilizados dados de alta resolução espacial.

Diante do exposto, o objetivo da pesquisa é testar a aplicação da Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros-finais (MESMA; Roberts et al., 1998) para indicação da distribuição espacial de castanhais nativos de *Bertholletia excelsa* na região de Tefé (AM), norte do Brasil, a fim de subsidiar o manejo sustentável da espécie.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo está localizada no município de Tefé, no estado do Amazonas, região Norte do Brasil, entre as coordenadas 3,61° e 3,65° Sul e 64,29° e 64,33° Oeste (Figura 1). De acordo com o IBGE (2004) a vegetação é caracterizada como Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, entremeada com áreas de Vegetação Secundária e Atividades Agrícolas.

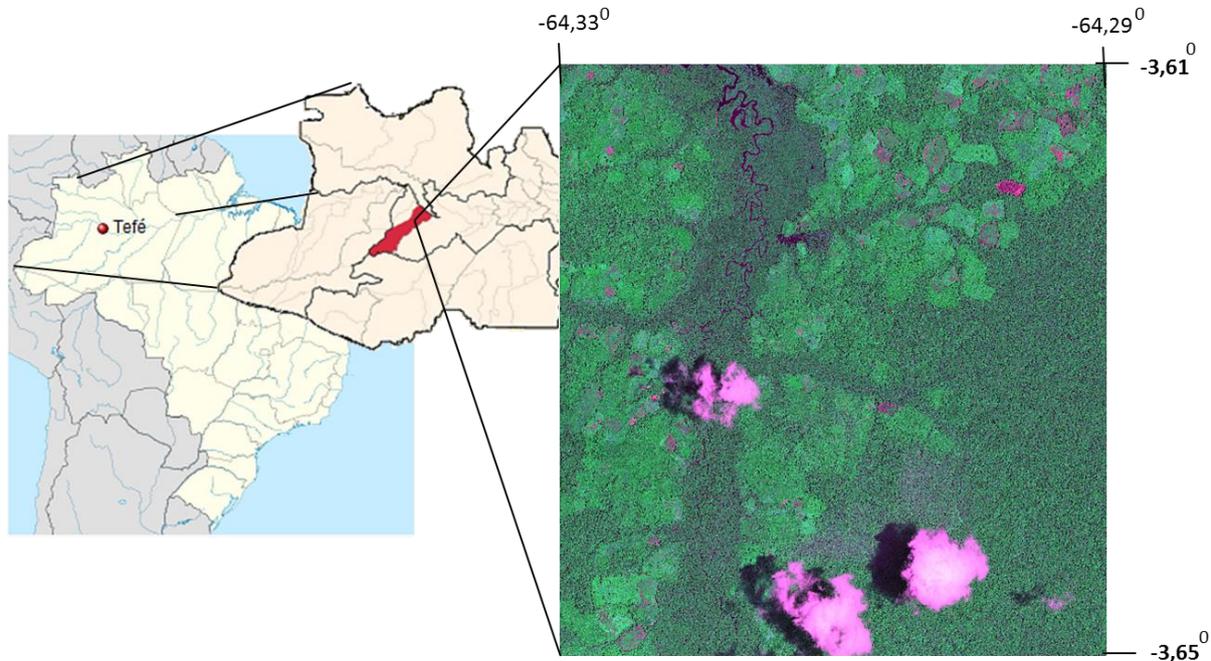


Figura 1. Localização da área de estudo, pertencente ao município de Tefé, Estado do Amazonas, Brasil, e imagem em cores reais WorldView 2 utilizada no estudo.

Foram utilizadas imagens do sensor orbital WorldView2 (DigitalGlobe Incorporated, Longmont, CO,EUA), obtidas no dia 22 de janeiro de 2014 às 14:58, com 4% de cobertura de nuvens, e com as seguintes bandas espectrais: pancromática (450-800 nm), azul extremo (400-450 nm), azul (450-510 nm), verde (510-580 nm), amarelo (585-625 nm), vermelho (630-690 nm), *red-edge* (705-745 nm), infravermelho próximo -1 (770-895 nm) e infravermelho próximo -2 (860-1040 nm). A imagem pancromática apresenta resolução espacial de 0,5 m e as multiespectral de 2,4 m. O processamento de imagens foi realizado conforme apresentado no fluxograma abaixo (Figura 2).

As imagens foram corrigidas atmosféricamente utilizando o módulo de correção atmosférica *QUick Atmospheric Correction* (QUAC), que efetua a correção com modelos empíricos utilizando apenas as informações espectrais médias dos objetos que compõem a cena. Utilizando as bandas das regiões espectrais do infravermelho próximo-1 e do vermelho, foi gerada uma imagem *Normalized Difference Vegetation Index*(NDVI) para distinção de feições de vegetação e não-vegetação. Após análise da imagem e do histograma, um limiar de 0,5 foi definido para elaboração da máscara de não-vegetação (feições de nuvem, sombra de nuvem, água líquida e solo exposto). Assim, todos os pixels com NDVI inferior a 0,5 foram excluídos da cena. A imagem multiespectral (8 bandas) teve, então, seu contínuo removido a fim de normalizar as diferenças de brilho dos dados e enfatizar as feições de absorção presentes no intervalo espectral (Clark e Roush, 1984). Os processamentos subsequentes foram testados com imagem e espectros tanto em reflectância (REF) da superfície como com contínuo removido (CR).

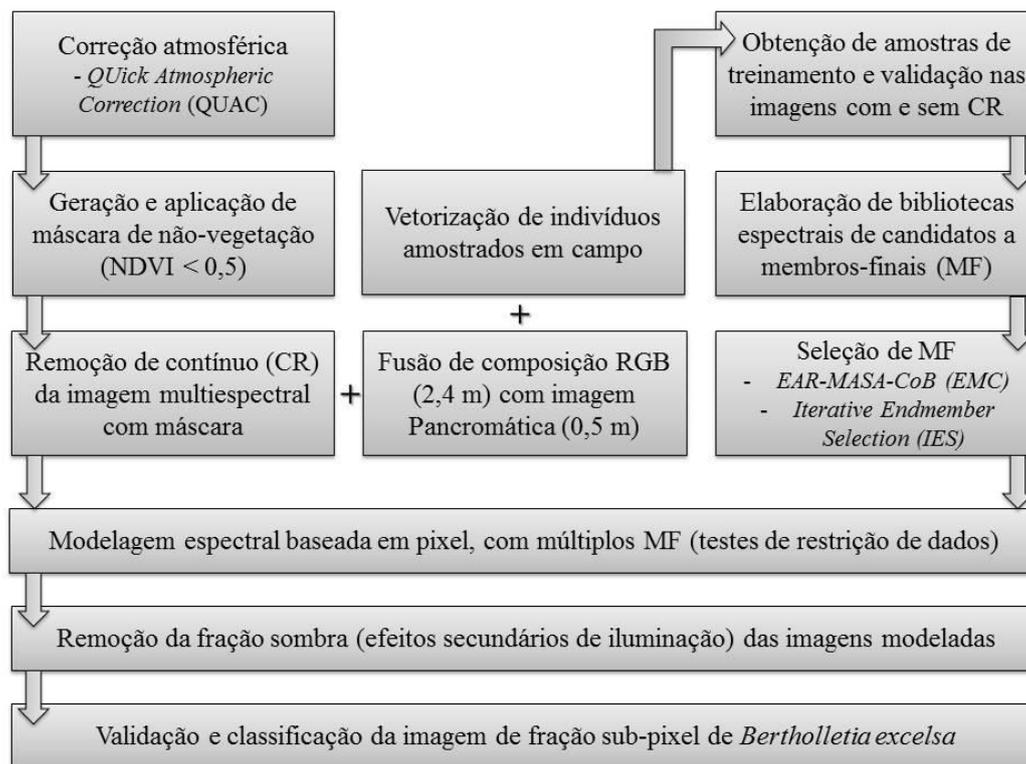


Figura 2. Fluxograma de processamento dos dados.

Para coleta de amostras de referência nas imagens multiespectrais (em REF e com CR) foram utilizadas 42 coordenadas de campo, coletadas com Sistema de Posicionamento Global de navegação, indicando a localização de indivíduos de *Bertholletia excelsa*. Foram considerados também indivíduos isolados mantidos em áreas antropizadas, de “roçado”. Com auxílio de uma composição colorida falsa-cor fusionada com a imagem pancromática (0,5 m), foram coletadas amostras de treinamento de 4x4 m sobre as copas das árvores, em ambas as imagens (REF e CR). Foram coletadas 40 amostras sobre as copas de *Bertholletia excelsa* e 41 amostras de outras espécies fotossinteticamente ativas (incluindo vegetação herbácea) em ambas as imagens (REF e CR). Essas foram segmentadas aleatoriamente em amostras de treinamento e de validação, considerando uma proporção de 50%.

Das 40 amostras de treinamento foram criadas bibliotecas espectrais, extraídas de ambas as imagens (REF e CR); para essas metadados foram criados. Utilizando o ViperTools (Roberts et al., 2007), as bibliotecas foram manejadas, os valores de brilho dos espectros foram extraídos e matrizes quadradas, considerando diferentes restrições de dados, foram criadas. Foram testadas restrições dos limiares de frações (variando de -0,01 a 1,01 e de -0,05 a 1,05), considerando o erro quadrático médio (EQM) sempre inferior a 0,025. Nessas matrizes foram armazenadas, em formato BSQ, informações como: EQM, ângulo espectral, membros-finais brilhantes e escuros e tipo de restrição de dados.

A seleção de membros-finais (MF) utilizando as métricas EMC (*EAR-MASA-CoB*) no ViperTools (Roberts et al., 2007) foi realizada através da seleção de espectros com valor mínimo de *Endmember Average RMSE* (EAR) (Dennison e Roberts, 2003), valor mínimo de *Minimum Average Spectral Angle* (MASA) (Dennison et al., 2004) e valor máximo de *Cont-Based Index* (CoBIndex) (Roberts et al., 2003). As bibliotecas de MF geradas via EMC foram compostas por, no máximo, três espectros por classe. A seleção de membros-finais via IES (*Iterative Endmember Selection*) foi realizada utilizando rotina em *Interactive Data Language* – IDL (Schaaf et al., 2011; Roth et al., 2012). Os MF foram selecionados de forma automatizada, por processo de adição e subtração de espectros, até que o maior coeficiente Kappa fosse atingido em classificações entre os candidatos a MF (Schaaf et al., 2011).

De posse das bibliotecas de MF (REF e CR) as imagens passaram por Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros-finais (MESMA; Roberts et al., 1998), utilizando modelos com três MF: MF de *Bertholletia excelsa*, MF de outras espécies e MF de sombra fotogramétrica. Os limiares de restrição de dados testados na modelagem espectral das imagens, foram selecionados em consonância com aqueles previamente definidos na geração das matrizes quadradas. O EQM permitido nas modelagens baseadas em pixel foi mantido como $\leq 0,025$. A técnica de normalização de sombra foi aplicada sobre as imagens de fração, a fim de eliminar efeitos secundários de iluminação que variam com a elevação solar, o azimute, a inclinação do terreno e o aspecto e rugosidade da superfície (Adams et al., 1986; Smith et al., 1990a and 1990b). A validação dos resultados foi realizada utilizando as 41 amostras de validação (20 de *Bertholletia excelsa* e 21 de outras espécies). O resultado que apresentou maior exatidão específica (i.e. menos pixels modelados e mais baixos valores de fração de *Bertholletia excelsa* nas copas de outras espécies, bem como mais altos valores da fração-alvo nas copas de *Bertholletia excelsa*) foi, então, classificado manualmente para representação de distribuição da espécie em questão. O limiar de porcentagem da fração sub-pixel de *Bertholletia excelsa*, utilizado para essa classificação booleana, foi definido quando atingido pelo maior número de copas de *Bertholletia excelsa* pelo menor número de copas de outras espécies, dentre as amostras de validação.

3. Resultados e discussão

Como já discutido por outros autores (p.ex., Young et al., 2011; Amaral et al., 2015), a remoção do contínuo, de uma forma geral, permite melhores resultados em Análises de Mistura Espectral com Múltiplos Membros-finais (MESMA), quando o enfoque é o mapeamento de espécies. Embora o método *Iterative Endmember Selection* (IES) para seleção de membros-finais (MF) tem sido relatado como mais eficiente que o *EAR-MASA-CoB* (EMC) (p.ex. Schaaf et al., 2011; Roth et al., 2012; Amaral et al., 2015), nesse estudo o melhor resultado foi obtido utilizando MF selecionados via EMC. De forma automatizada, utilizando um limiar de fração entre -0,01 e 1,01 para espectros com contínuo removido, o IES definiu nove MF para a classe de outras vegetações, indicando sua dificuldade em lidar com a alta variabilidade espectral presente na classe. A maior porcentagem de copas de *Bertholletia excelsa* (85%) com mais de 50% de sua fração foi atingida quando a imagem foi modelada com essa biblioteca de MF, no entanto, 48% das copas de outras vegetações também apresentam valores superiores a 50% da fração de *Bertholletia excelsa*.

O resultado mais exato foi obtido utilizando biblioteca de MF selecionados via EMC, com limiar de fração entre -0,01 e 1,01, $EQM \leq 0,025$ e imagem e MF com prévia remoção do contínuo. Nesse, apresentaram fração de *Bertholletia excelsa* superior a 50%:70% das copas de *Bertholletia excelsa* 19% das copas de outras vegetações. Um limiar de 56% da fração de *Bertholletia excelsa* foi definido para classificação da imagem de fração e análise de distribuição espacial da espécie. Com esse limiar, 65% das copas de validação foram corretamente classificadas como *Bertholletia excelsa* 9,5% das copas de outras vegetações foram erroneamente classificadas como sendo da espécie-alvo. Assim, para o mapeamento optou-se pelo aumento do erro de omissão (5%) e redução do erro de comissão espectral (9,5%), a fim de melhor representar a distribuição espacial da espécie (Figura 3).

É observada uma maior densidade de pixels classificados como *Bertholletia excelsa* nas áreas de Terra Firme, local de ocorrência da espécie (Souza et al., 2008). Além disso, nessas áreas, são observadas manchas com alta concentração de pixels classificados como *Bertholletia excelsa*, o que pode corresponder a castanhas nativas onde os indivíduos ocorrem de forma aglomerada.

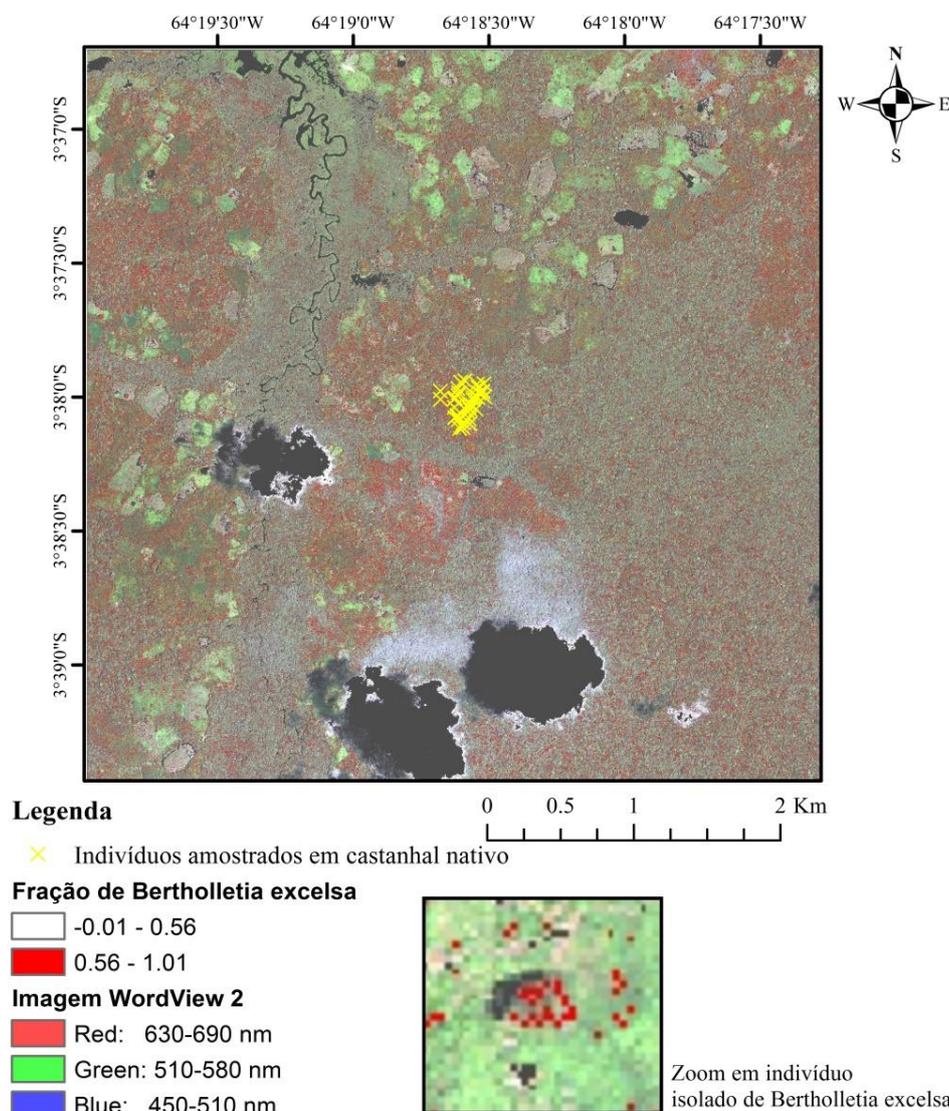


Figura 3. Distribuição espacial dos pixels classificados como *Bertholletia excelsa* (em vermelho), sobre composição colorida em cores reais de imagem WordView 2, em Tefé, Amazonas, Brasil. Em amarelo, indivíduos amostrados em campo.

Ainda são observadas confusões espectrais principalmente com formações secundárias presentes na paisagem, que possivelmente poderão ser diminuídas com a aplicação prévia de máscara textural. De forma geral, os dosséis de formações primárias e secundárias em estágio avançado de sucessão, onde ocorrem castanhais nativos, são mais rugosos do que os de formações secundárias em estágios iniciais de sucessão. Acredita-se ainda que a obtenção de um maior número de amostras de campo, incluindo mais espécies, bem como a replicação do método utilizando imagens do sensor WorldView 3 (DigitalGlobe Incorporated, Longmont, CO, EUA), com acreção de oito bandas da região espectral do infravermelho ondas curtas em relação aos dados utilizados, a exatidão dos resultados será ainda maior. Diversos autores têm relatado a importância dessa região espectral no mapeamento de espécies em ambientes tropicais (Clark et al., 2005; Amaral et al., 2015; Ferreira et al., 2016). A técnica MESMA, que permite vários MF por classe, mostrou-se adequada ao estudo, bem como a remoção da fração sombra, excluindo também efeitos secundários indesejáveis de iluminação. Destaca-se a utilização da técnica juntamente à seleção de membros-finais EAR-MASA-CoB (EMC) que, ao defrontar pixels de copas de espécies que possivelmente não tiveram MF correspondentes às mesmas, não os modelaram. Enquanto todas as copas de validação de *Bertholletia excelsa* foram modeladas no melhor resultado MESMA (70% com mais de 50% da fração-alvo), 81% das copas de outras espécies não foram modeladas.

4. Conclusões

O melhor resultado da modelagem baseada em pixel da fração espectral de *Bertholletia excelsa*, através da técnica de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Membros-finais (MESMA), em imagem WorldView 2, da região de Tefé, Amazonas, Brasil, foi obtido utilizando biblioteca de membros-finais (MF) selecionados via EAR-MASA-CoB (EMC), com limiar de fração entre -0,01 e 1,01, Erro Quadrático Médio (EQM) $\leq 0,025$ e imagem e MF com prévia remoção do contínuo. Um limiar de 56% da fração de *Bertholletia excelsa* foi definido para classificação booleana da imagem de fração e análise de distribuição espacial da espécie. Com esse limiar, 65% das copas de validação foram corretamente classificadas como *Bertholletia excelsa* e 9,5% das copas de outras vegetações foram erroneamente classificadas como sendo da espécie-alvo. Na imagem classificada é observada uma maior densidade de pixels classificados como *Bertholletia excelsa* nas áreas de Terra Firme. Nessas áreas, destacam-se manchas com alta concentração de pixels classificados como *Bertholletia excelsa*, o que deve corresponder a castanhais nativos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Sulsoft pela cessão de licença temporária do software ENVI e módulos, para processamento dos dados. Ao projeto Mapeamento de Castanhais Nativos e Caracterização Socioambiental e Econômica de Sistemas de Produção da Castanha-do-Brasil na Amazônia-MapCast, financiado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa.

Referências Bibliográficas

- Adams, J. B.; Smith, M. O.; Johnson, P. E. Spectral mixture modeling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 91, n. B8, p. 8098-8112, 1986.
- Adams, J.B.; Smith, M.O.; Gillespie, A.R. Imaging spectroscopy: interpretation based on spectral mixture analysis. In: Pieters, C.M.; Englert, P.A.J. (Eds.), **Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition**. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1993.
- Amaral, C. H.; Roberts, D. A.; Almeida, T. I. R.; Souza Filho, C.R. Mapping invasive species and spectral mixture relationships with neotropical woody formations in southeastern Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 108, p. 80-93, 2015.
- Avery, T. E.; Berlind, G.L. **Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation**. 5 ed, New Jersey, Prentice Hall, 1992. 472p.

- Clark, M.; Roberts, D. A.; Clark, D. B. Hyperspectral discrimination of tropical forest tree species at leaf to crown scales. **Remote Sensing of Environment**, v.96, v.3-4, p.375-398, 2012.
- Clark, R. N., & Roush, T. L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, p. 6329-6340, 1984.
- Dennison, P.E., Halligan, K.Q., Roberts, D.A., 2004. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 359-367, 2004.
- Dennison, P.E., Roberts, D.A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2, p. 123-135, 2003.
- Ferreira, M. P.; Zortea, M.; Zanotta, D. C.; Shimabukuro, Y. E.; Souza Filho, C. R. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 179, p. 66-78, 2016.
- Gonzalez-Orozco, C. E.; Mulligan, M.; Trichon, V.; Jarvis, A. Taxonomic identification of Amazonian tree crowns from aerial photography, **Applied Vegetation Science**, v.13, n.?, , p.510-519, 2010.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Disponível em: < ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/> Acesso em: 15 out. 2016.
- Immitzer, M.; Atzberger, C.; Koukal, T. Tree species classification with Random Forest using very high spatial 8-band Worldview-2 satellite data. **Remote Sensing**, v. 4, p.2661-2693, 2012.
- Keshava, N. ; Mustard, J.F., 2002, Spectral unmixing. **IEEE Processing Magazine**, v. 2, 2002.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3rded, John Wiley and Sons, 1992. 750p.
- Myers, B.J.; Benson, M.L. Rainforest species on large-scale color photos. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 47, n.4, p.505-513, 1981.
- Roberts, D. A., Dennison, P. E., Gardner, M. E., Hetzel, Y., Ustin, S. L., Lee, C. T. Evaluation of the potential of Hyperion for fire danger assessment by comparison to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1297-1310, 2003.
- Roberts, D. A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., & Green, R. O. Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v.65, p.267-279, 1998.
- Roberts, D. A.; Halligan, K. Q.; Dennison, P. E. **VIPER Tools**:user manual version 1.5. 2007. Disponível em <http://www.vipertools.org/>. Acesso em 17 Fev. 2013.
- Roth, K.L., Dennison, P.E., Roberts, D.A. Comparing endmember selection techniques for accurate mapping of plant species and land cover using imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 139-152, 2012.
- Schaaf, A.N., Dennison, P.E., Fryer, G.K., Roth, K.L., Roberts, D.A. Mapping plant functional types at three spatial resolutions using multiple endmember spectral mixture analysis. **GIScience and Remote Sensing**, v. 48, p. 324-344, 2011.
- Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B., Gillespie, A.R., Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. **Remote sensing of Environment**, v. 31, n. 1, p. 1-26, 1990a.
- Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B., Gillespie, A.R., Vegetation in deserts: II. Environmental influences on regional abundance. **Remote sensing of environment**, v. 31, n. 1, p. 27-52, 1990b.
- Somers, B., Asner, G.P., Tits, L., Coppin, P., Endmember variability in spectral mixture analysis: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 7, p. 1603-1616, 2011.
- Souza, C. R.; Azevedo, C. P.; Rossi, L. M. B; Lima, R. M. B. **Castanha-do-Brasil (Bertholletia excelsa Humb. & Bonpl.)**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2008. 4p. (Comunicado Técnico, 63).
- Trichon, V, Crown typology and the identification of rain forest trees on large-scale aerial photographs. **Plant Ecology**, v.153, n.1/2, p.301-312, 2001.
- Youngtob, K. N., Roberts, D. A., Held, A. A., Dennison, P. E., Jia, X., Lindenmayer, D. B. Mapping two Eucalyptus subgenera using multiple endmember spectral mixture analysis and continuum-removed imaging spectrometry data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 5, p. 1115-1128, 2011.