
SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CULTIVO DE BAMBU

Ludmily da Silva Pereira

Débora de Oliveira Silva

Sérgio Vicente Denser Pamboukian

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

Este capítulo ilustra como o geoprocessamento e o comportamento espectral das vegetações podem auxiliar na agricultura. A agricultura de precisão utiliza técnicas que proporcionam grandes benefícios quanto a produtividade e qualidade da cultura, afetando diretamente a rentabilidade e o desenvolvimento econômico rural. O estudo realizado tem como finalidade verificar a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para plantios de bambu, apresentando os aspectos teóricos e práticos adotados para regiões de cultivo. São analisadas imagens de satélite por meio do *software* QGIS 2.14.4 quanto ao índice de vegetação e à assinatura espectral para determinação da condição da planta e determinação de áreas de cultivo. Os resultados mostram que o emprego da correção atmosférica é essencial para análise dos resultados dos índices de vegetação. Para a assinatura espectral notou-se que diferentes espécies do bambu possuem comportamento espectral similar e que a sua individualização, ante outros objetos presentes na área em estudo, foi realizada de maneira mais adequada, na região do infravermelho de ondas curtas.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Comportamento espectral. Índices de vegetação.

1 INTRODUÇÃO

Geoprocessamento consiste na utilização de técnicas matemáticas e computacionais para obter e analisar informações espaciais, o que permite o desenvolvimento constante de novas aplicações, principalmente nas áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes e Planejamento Urbano. A análise de certas informações, como distribuição geográfica de recursos naturais, se torna muito fácil quando o acontecimento é diretamente relacionado com a sua posição espacial. Antes do geoprocessamento, tais informações eram armazenadas em documentos e mapas em papel, o que dificultava a combinação de dados. O aparecimento do geoprocessamento possibilitou a análise das informações em conjunto e a geração de dados e mapas adequados para melhor embasar as tomadas de decisão sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais.

As ferramentas computacionais utilizadas por essa disciplina, chamada de Sistema de Informações Geográficas (SIG), permitem a realização de análises complexas, gestão ou representação do espaço e dos fenômenos que nele ocorrem a partir da coleta e tratamento de informações georreferenciadas, ou seja, informações que possuam uma localização geográfica. Existem vários *softwares* que executam as atividades de processamento, como QGIS, Spring, gvSIG, ArcGIS, MapInfo e outros.

Uma ferramenta importante, presente em ambientes SIG, é a análise de imagens de Sensoriamento Remoto (SR). O SR é uma técnica que obtém dados da superfície terrestre por meio da captação e registro em imagem da energia refletida/emitida pela superfície, sem que haja contato físico entre o sensor e o alvo estudado. A imagem é analisada a partir do comportamento espectral que os objetos em estudo apresentam em cada comprimento de onda.

O produto do SR é utilizado para diferentes finalidades, nas quais se destacam estudos sobre vegetação, por meio dos Índices de Vegetação (IV), desenvolvidos para auxiliar na otimização da avaliação e detecção de parâmetros biofísicos das plantas, relacionados com a diferença da refletância entre as bandas do espectro. Os dados obtidos nesses cálculos, assim como a experiência e o conhecimento do profissional responsável formam uma base para decisões corretivas e preventivas, minimizando custos e aumentando a produtividade na agricultura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste artigo é avaliar o comportamento espectral de plantações de bambu, assim como indicadores de vegetação visando a distinção de plantios de bambu e conclusões relacionadas ao seu estado e suas características, a partir do uso de imagens de sensoriamento remoto. Assim, objetiva-se que essas técnicas sejam utilizadas para o desenvolvimento da agricultura de precisão específica para o cultivo de bambu.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo principal, este trabalho:

- analisa a influência da correção atmosférica no cálculo de índices de vegetação;
- analisa as bandas de SR que devem ser utilizadas para gerar a assinatura espectral das vegetações;
- mostra como é possível diferenciar bambu de outros cultivos com base na assinatura espectral.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sensoriamento remoto

Sensoriamento Remoto é uma ferramenta do geoprocessamento utilizada para obter informações sobre objetos por meio de dados coletados por instrumentos que não estejam em contato físico com os objetos de interesse, seja no espaço aéreo, seja no espaço orbital. Os sensores remotos funcionam como “máquinas fotográficas digitais”, que captam e registram em forma de imagem a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre. A forma de transmissão dos dados, do objeto para o sensor, é por meio da Radiação Eletromagnética (REM) em diferentes comprimentos de onda, representados no espectro eletromagnético por bandas ou regiões. A região visível do espectro é dividida em faixas representadas pelas cores azul, verde e vermelho.

Acima do vermelho está a região do infravermelho, e logo abaixo do azul está o ultravioleta, que são espectros invisíveis (STEFFEN, s. d.).

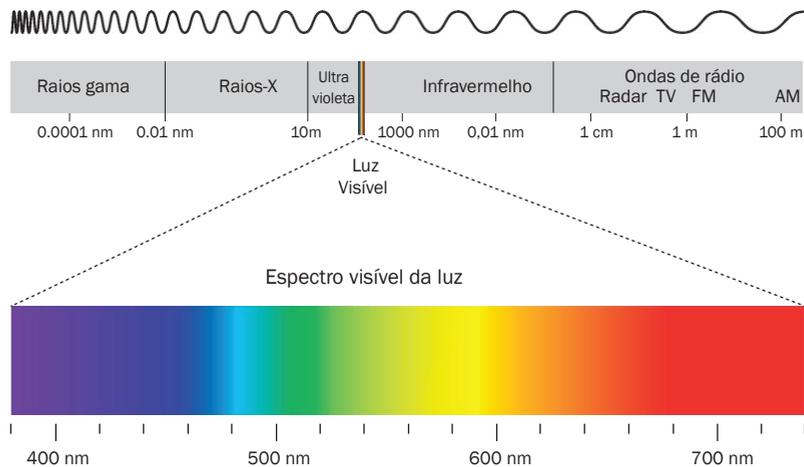


Figura 1 Comprimento de onda do espectro visível.

Fonte: Furian (2016).

Como pode ser observado na Figura 1, a faixa azul do espectro visível da luz possui comprimento de onda no intervalo de 0,35 a 0,50 μm , a verde, de 0,50 a 0,62 μm , e a vermelha, de 0,62 a 0,70 μm , aproximadamente.

De acordo com Venturieri (2007), os objetos da superfície terrestre, como a vegetação, a água e o solo, absorvem e espalham (reflexão e transmissão) a radiação eletromagnética, em proporções que variam com as características do fluxo como comprimento de onda, ângulo de incidência e polarização, além das características físico-químicas desses elementos.

As variações da energia refletida pelos objetos em diferentes bandas, seja ele no visível, seja no invisível, podem ser representadas graficamente pela curva de refletância espectral (refletância x comprimento de onda), como ilustra a Figura 2.

Na Figura 2 é possível observar que as curvas dos objetos apresentados na região do visível encontram-se muito próximas entre si, em contraste com a região do invisível (infravermelho) onde há um maior distanciamento entre elas. Isso indica que na região do visível os objetos apresentam-se parecidos, enquanto na região do infravermelho eles podem ser facilmente individualizados (VENTURIERI, 2007).

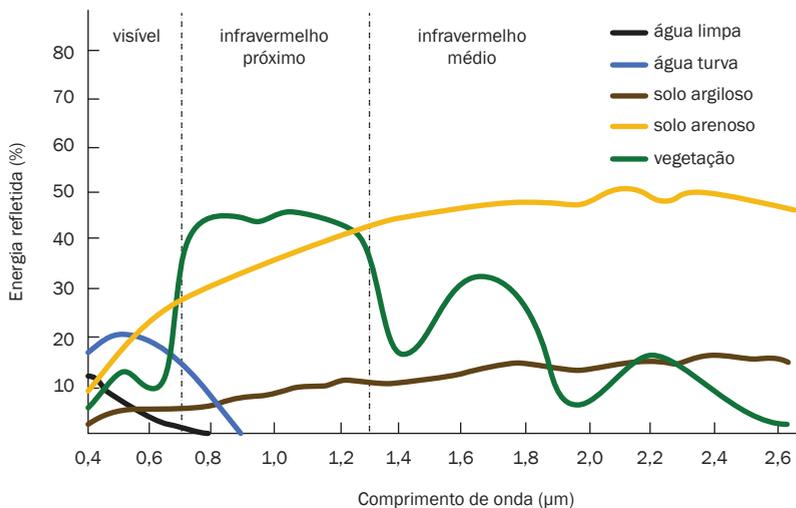


Figura 2 Comportamento espectral de objetos.

Fonte: Florenzano (2011).

A área do SR que identifica a intensidade com que cada material reflete a radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda do espectro é denominada radiometria ou comportamento espectral. O conhecimento sobre o comportamento espectral de objetos é fundamental para a extração de informações a partir de produtos de SR. Uma das primeiras aplicações dos dados obtidos remotamente tem sido a detecção de diferenças na refletância, relacionadas à densidade da cobertura vegetal.

2.2 Índices de vegetação

A vegetação é constituída por muitos elementos como folhas, galhos, frutos e flores, entre eles a folha é considerada a principal influência no comportamento espectral da vegetação, pois na faixa espectral do vermelho há alta absorção de energia solar devido à presença da clorofila, o que ocasiona baixa refletância, portanto em tonalidade escura no produto do SR. Por sua vez, na banda do infravermelho próximo, devido à estrutura celular das folhas, a absorção é baixa, o que resulta em alta refletância e tonalidade clara (RUDORFF, s. d.).

A partir da integração das bandas espectrais, foram criadas combinações matemáticas que aumentam a eficiência na extração de informações sobre as características, e atividades da vegetação, denominadas Índices de Vegetação (IV). Geralmente esses

índices utilizam os valores de refletância na faixa do vermelho (*Red* - *R*) e infravermelho próximo (*Near-infrared* - *NIR*), como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - *NDVI*), proposto por Rouse *et al.* (1973), conforme a Equação 1:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

O NDVI é um indicador numérico no intervalo de 0 (vegetação sem folha, submetida a condição de estresse hídrico por déficit de água no solo) a 1,0 (vegetação com folhas, sem restrições hídricas e na plenitude de suas funções metabólicas e fisiológicas), baseado em quanto mais verde, nutrida, sadia e bem suprida, do ponto de vista hídrico for a planta, maior será a absorção do vermelho e maior será a refletância do infravermelho.

Elmore *et al.* (2000 apud PRATES, 2014) indicam que uma desvantagem do índice NDVI é a significativa influência do efeito espectral do solo existente entre a vegetação, o que prejudica as avaliações da vegetação.

Segundo o Instituto Nacional do Semiárido (INSA) (BRASIL, 2014), o NDVI possui várias aplicações, “[...] estimativa de parâmetros da vegetação (cobertura vegetal, índice de área foliar); atividades agrícolas (monitoramento do ciclo de crescimento de culturas, modelagem do crescimento e produtividade de plantações); monitoramento de secas; detecção de desmatamentos; avaliação de áreas queimadas [...]”.

Essas técnicas e tecnologias são utilizadas no setor agrícola para identificação de problemas com os cultivos e formação de dados que podem melhor embasar as soluções.

2.3 Agricultura de precisão

A Agricultura de Precisão (AP) consiste em um conjunto de informações e tecnologias que objetiva um gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo, com base no manejo diferenciado de áreas na agricultura, pois fundamenta-se nos conceitos de que as variabilidades de espaço e tempo influenciam nos rendimentos dos cultivos.

A AP se distingue da agricultura tradicional por seu nível de manejo, ao invés de administrar uma área inteira como uma única unidade, o manejo é adaptado para áreas de menor dimensão individualmente dentro de um mesmo campo. Isso se tornou possível devido à disponibilidade de ferramentas fornecidas pelas geotecnologias, como o uso dos Sistemas de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems* - GNSS), do Sistema de Informações Geográficas (SIG), de instrumentos e

de sensores para medidas ou detecção de parâmetros ou de alvos de interesse no agroecossistema (solo, planta, insetos e doenças).

Deve-se ressaltar que a AP não está relacionada somente ao uso de ferramentas de alta tecnologia, pois entre os seus fundamentos também estão o planejamento e o gerenciamento, que podem ser empregados no dia a dia das propriedades, pela maior organização e controle das atividades, dos gastos e produtividade em cada pedaço do cultivo. A AP considera a produção agrícola em todos os seus aspectos: produtividade, avaliação nutricional do solo, detecção de pragas e doenças, e avaliação da necessidade hídrica das plantas. Assim, a maior quantidade de dados coletados, e a qualidade, implica informação mais consistente e conseqüentemente mais preciso será o diagnóstico referente à variabilidade presente nos campos analisados.

Dessa forma, a AP permite ao produtor rural a gestão de sua propriedade, na identificação dos fatores causadores da variabilidade da produção e na correção desses fatores por meio da aplicação dos insumos, na hora certa, no local adequado e na quantidade correta, promovendo o aumento da produtividade e sustentabilidade.

O coordenador-geral de Tecnologia, Inovação e Recursos Genéticos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), Fabrício Vieira Juntolli, durante uma entrevista concedida a Redação do Globo Rural (2015), afirma que no Brasil a AP foi introduzida nos anos 1990, por meio da popularização de máquinas agrícolas com receptores GNSS, computadores de bordo e sistemas que possibilitavam a geração de mapas de produtividade. Os estados que mais usam a AP atualmente são Goiás, Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, principalmente na produção de grãos e em culturas perenes. Declara ainda que o uso da agricultura de precisão no Brasil é mais focado na aplicação de fertilizantes e corretivos no solo.

Existem duas estratégias que podem ser adotadas para tal utilização, a mais simples delas está relacionada ao manejo da fertilidade do solo por meio do gerenciamento da sua correção e adubação (fertilizantes e calcário) das áreas agrícolas, com base apenas em amostragem georreferenciada do solo. Outra estratégia utilizada, mais elaborada, considera não apenas o solo, mas também a vegetação, pois leva em consideração a produtividade das culturas anteriores para se fazer a reposição dos nutrientes extraídos (BRASÍLIA, 2013).

2.4 Agricultura de bambu no Brasil

Típico de áreas alagadas, o bambu é um recurso natural leve, resistente e com grande potencial econômico.

O Brasil possui uma das maiores reservas de bambu nativo e é o país com maior diversidade de espécies, sendo 252 espécies nativas. Estima-se que na Amazônia exis-

tam 6 milhões de hectares da planta em floresta nativa, com maior concentração no Acre (KORTE, 2016).

Essas reservas constituem uma possibilidade econômica sustentável ainda subutilizada, com múltiplos aproveitamentos para geração de renda e trabalho devido às inúmeras aplicabilidades do bambu, por exemplo: recuperação de áreas degradadas, fontes de biomassa, matéria-prima para construção civil, fibras para papel e para a indústria têxtil, entre outras.

Atualmente existem poucas plantações com o fim de exploração comercial no Brasil, as mais significativas concentram-se nos estados de Maranhão, Piauí, Pernambuco, Paraíba e Bahia, que possuem grandes áreas de plantio destinado a biomassa e celulose (SANTI, 2015). Com o objetivo de incentivar o manejo sustentável e o cultivo das espécies nativas, além de estimular a ampliação do comércio interno e externo desse produto e seus subprodutos, foi elaborada a Lei n. 12.484/2011, que dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMCB). Essa política prevê incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico para o manejo e usos do bambu. Com a lei, o governo incentiva a transformação dos bambus brasileiros em floresta capaz de gerar emprego, renda e até créditos de carbono.

O bambu é uma alternativa para geração de emprego e renda para a agricultores familiares e favorece as políticas de conservação e preservação do meio ambiente, porque é uma espécie de fácil propagação, possui rápido crescimento, e neutraliza carbono. Contudo, segundo Borba (2011), o cultivo precisa de manejo sustentável, pois, em virtude da fácil propagação, o bambu pode se tornar uma praga e ameaçar a vegetação natural das regiões. Assim, além da ampliação de mercado, é necessária a disponibilidade de instruções técnicas aos plantadores quanto a plantio, colheita, tratamento e manuseio do bambu, para garantia de um melhor aproveitamento.

2.5 Aplicação da agricultura de precisão no cultivo de bambu

A utilização da AP específica para o plantio de bambu não é comum no Brasil, porém sabe-se que ela pode auxiliar no seu manejo; como essa planta possui um rápido crescimento e dificuldade de acesso para grandes áreas de cultivo, a AP, juntamente com suas tecnologias, desempenha um papel importante quanto a identificação e controle de pragas, mortalidade, monitoramento do cultivo, entre outros. Dentre as análises das pesquisas feitas, é comum o estudo do comportamento temporal, espacial e espectral do ciclo de vida de populações de bambu, pois a partir da diferença de espectros é possível distinguir, em uma mesma região, entre áreas com bambu maduro (de diversas idades), recentemente morto e sem bambu.

O uso do Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas para mapeamento de padrões na identificação e monitoramento de tipologias florestais e perturbações naturais para auxílio da produtividade ainda está em estudo e análises científicas, principalmente no Acre.

3 ESTUDO DE CASO

Foram executados dois estudos específicos. O primeiro mostra como a correção atmosférica das imagens de Sensoriamento Remoto podem influenciar no cálculo de Índices de Vegetação. O segundo mostra como diferenciar o plantio de Bambu de outras vegetações por meio da assinatura espectral.

3.1 Influência da correção atmosférica no cálculo do NDVI

A área de estudo possui 5 ha de bambu da espécie *Guadua angustifolia*, com aproximadamente sete anos de idade e está localizada no município de Jacutinga (MG), definida pela coordenada central 22°19'49.07"S e 46°41'15.41"O, apresentada na Figura 3 (Informação verbal).¹

1 Informações fornecidas pelo presidente da Associação Brasileira de Produtores de Bambu (Aprobambu), Guilherme Korte, São Paulo, em 22 agosto de 2016.



Figura 3 Localização área de plantio no *Google Earth*.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Para a elaboração desse estudo, foi efetuada a aquisição de imagens orbitais de 8 de agosto de 2016, captadas pelo sensor *Operational Land Imager* (OLI), instalado a bordo do satélite Landsat-8, com resolução espacial de 30 m. Essas imagens estão disponíveis de forma gratuita por meio do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Optou-se pela imagem mais recente e sem presença de nuvens.

Nas imagens do Landsat-8, a banda 4 corresponde ao vermelho e a banda 5 corresponde ao infravermelho próximo. Como o NDVI baseia-se em simples combinações das refletâncias do vermelho e do infravermelho próximo, utilizam-se apenas essas duas bandas.

O SIG utilizado foi o QGIS Essen 2.14.4, no qual foram aplicadas as funções de mosaico (acúmulo de bandas espectrais) e modelos matemáticos.

Para melhorar visualmente a interpretação da imagem quanto à vegetação, utilizou-se a renderização Multibanda Colorida, com as faixas infravermelho próximo (visualizado na cor vermelha), Vermelho (visualizado na cor verde) e Verde (visualizado na cor azul) (Figura 4), pois sabe-se que as plantas refletem no infravermelho o verde, enquanto absorvem no vermelho. Essa combinação de bandas é útil para análise da saúde da planta; por exemplo, vegetações representadas com a tonalidade vermelho escuro (quando refletem mais próximo do infravermelho), tem maior concentração de clorofila e possuem crescimento denso, caracterizando uma vegetação saudável.

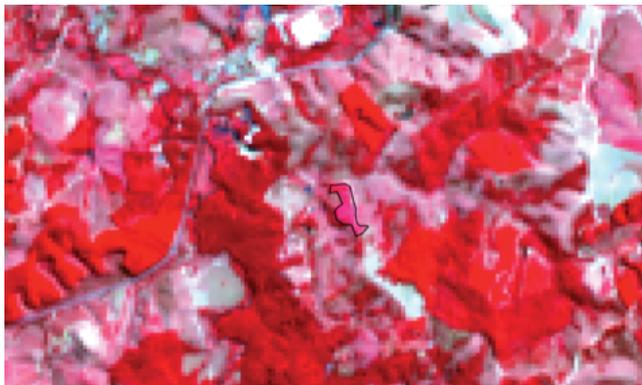


Figura 4 Comparação da área de plantio no QGIS.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

A diferença na tonalidade das vegetações é nítida, caracterizada pela densidade distinta entre a área de cultivo de bambu e a vegetação ao redor. A área destacada na Figura 4 é mais clara, pois a plantação de bambu reflete de forma equilibrada infravermelho e verde, atribuídos às cores vermelho e azul.

Para confirmação da conclusão inicial sobre o estado da vegetação, com a ferramenta calculadora *raster*, determinou-se o NDVI a partir de sua fórmula, que resultou em uma camada de banda única em tons de cinza, com intervalo de -1 a 1. Para a análise, a banda foi alterada para composição simples falsa-cor, onde é perceptível a diferença na tonalidade da região de plantio do bambu e das áreas verdes ao redor (Figura 5).

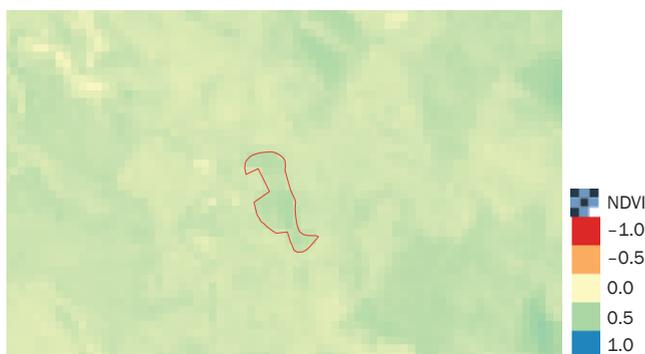


Figura 5 NDVI da área de plantio.

Fonte: Próprio autor (2016).

A área de cultivo apresentou intervalo de NDVI de 0,27 a 0,47 como destacado na Figura 6, por meio de filtro na calculadora *raster*.

Toda a região em branco corresponde ao intervalo descrito, porém isso não significa que a vegetação seja da mesma espécie, e sim que se encontra em condições físicas e biológicas parecidas. Pode-se observar, ainda na Figura 6, que a região estudada apresenta áreas fora do intervalo, representadas pela cor preta, o que pode significar a presença de solo exposto ou outras vegetações.

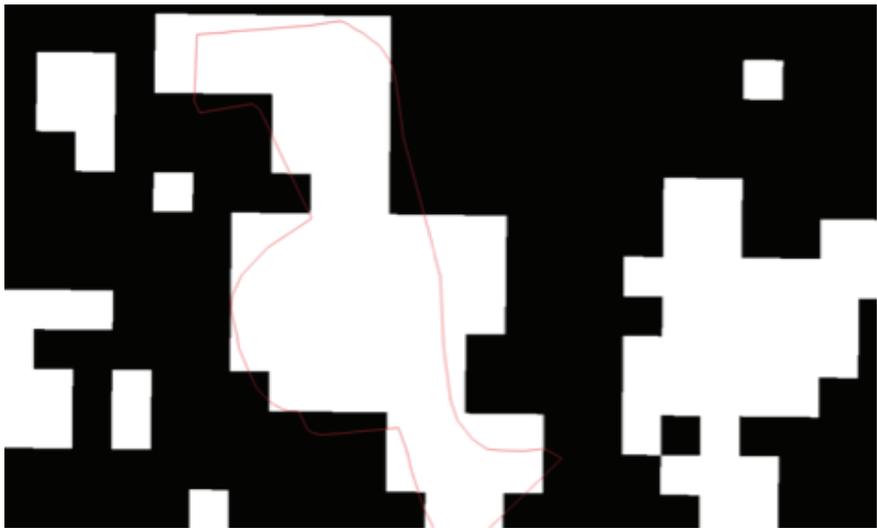


Figura 6 Filtro da área de plantio.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Devido à alteração do brilho da cena e à diminuição de contraste entre os alvos, efeitos da absorção e do espalhamento atmosférico, utilizou-se a correção atmosférica para a obtenção de melhores resultados no cálculo NDVI. O procedimento de correção atmosférica tira o efeito de dispersão da energia eletromagnética nas partículas de água suspensas na atmosfera, possibilitando que os alvos sejam mais bem interpretados. O método utilizado para a correção foi o DOS1 (*Dark Object Subtraction 1*), presente no complemento do QGIS para classificação de imagens de satélite, o *Semi Automatic Classification Plugin* (SCP). O DOS1 estima a interferência atmosférica a partir dos Números Digitais (ND) da imagem de satélite, desconsiderando a absorção atmosférica (ANDRADE et al., 2010).

Aplicando o NDVI na imagem com refletância corrigida, observa-se a significativa diferença de valores em todos os elementos. Para melhor identificação dos valores NDVI, a banda resultante foi alterada para composição simples falsa-cor, onde os valores são identificados por cores (Figura 7).

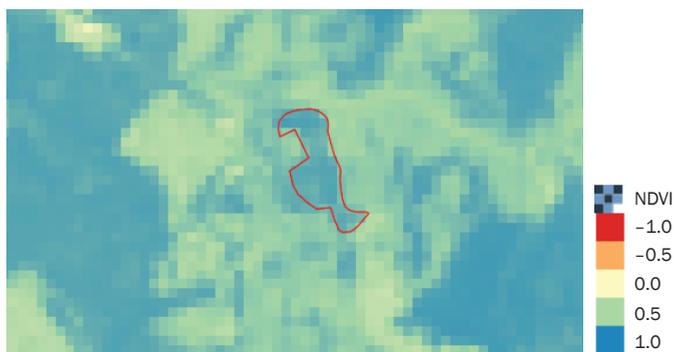


Figura 7 NDVI da área de plantio com imagem corrigida.

Fonte: Próprio autor (2016).

Realizou-se a amostragem dos valores NDVI da vegetação em cada *pixel* significativo da área de estudo na Figura 7, para análise dos valores resultantes da imagem com refletância corrigida e não corrigida.

TABELA 1

Valores de NDVI das imagens Landsat 8 corrigidas e não corrigidas

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variação
LANDSAT- 8 (Corrigida)	0,771	0,039	0,682	0,847	0,0020
LANDSAT- 8 (Não corrigida)	0,388	0,046	0,266	0,467	0,0055

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da análise da Tabela 1 nota-se a diferença entre os valores médios de NDVI adquiridos a partir de ambas as imagens. Os valores NDVI são subestimados na imagem não corrigida, além de possuir coeficiente de variação maior, portanto com maior dispersão, devido a influência atmosférica que altera os valores reais, que deveriam ser registrados pelo sensor.

Entende-se que o NDVI mensura o brilho referente a coloração verde e a umidade do solo, com base nisso os valores gerados indicam o estado de saúde da vegetação em análise. Assim, a diferença entre as refletâncias das bandas do vermelho e do infravermelho será tanto maior quanto mais verde for a vegetação, no caso do pigmento clorofila, pois o NDVI é mais sensível à presença dos pigmentos, que são responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho. Inicialmente a vegetação foi classificada com pouca folhagem e condição de certa carência de água. Após a correção, classifica-se a vegetação com folhas, apresentando condições adequadas hidricamente. A interpretação da mesma região de cultivo é controversa nas duas imagens, afirmando a importância da realização da correção atmosférica, para estudos e conclusões de índices de vegetação.

3.2 Discriminação do plantio de bambu de outras vegetações

A área a considerar neste segundo estudo de caso corresponde a uma floresta plantada de eucalipto com grandes manchas de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, localizada no estado de São Paulo, município de Mogi Guaçu, pertencente à International Paper, a título de Reserva Legal, definida pela coordenada central 22°21'13.00"S e 46°59'35.63"O, apresentada na Figura 8 (Informação verbal).²



Figura 8 Localização área de plantio Google Earth.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

2 Informações fornecidas pelo presidente da Associação Brasileira de Produtores de Bambu (Aprobambu), Guilherme Korte, São Paulo, em 22 agosto de 2016.

Para a elaboração desse estudo, foi efetuada a aquisição de imagens orbitais de 17 de junho de 2016 (período de estiagem), captadas pelo sensor MultiSpectral Instrument (MSI), instalado a bordo do satélite Sentinel-2A, com nível 1C de processamento.

Os satélites Sentinel-2 possuem 13 faixas espectrais, muito parecidas com as do Landsat 8, no entanto, com resoluções de 10m - Bandas 2 (0,490 μm), 3 (0,560 μm), 4 (0,665 μm) e 8 (0,842 μm), 20m - Bandas 5 (0,705 μm), 6 (0,740 μm), 7 (0,783 μm), 8a (0,865 μm), 11 (1,610 μm) e 12 (2,190 μm) e 60m - Bandas 1 (0,443 μm), 9 (0,940 μm) e 10 (1,375 μm) (AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA, 2015). Essas imagens são disponibilizadas gratuitamente no site da Agência Espacial Europeia (ESA). Optou-se pela imagem mais recente e sem presença de nuvens.

A discriminação dos diferentes tipos de vegetação presentes em uma área é fundamental no monitoramento da cobertura vegetal. Em uma imagem aérea as vegetações são visualmente distintas, devido a características como tonalidade, textura e densidade, porém, ao analisar uma região aparentemente homogênea com a assinatura espectral é possível individualizar as vegetações, pois é ilustrada a forma típica da vegetação refletir a REM incidente. Devido ao fato de os objetos apresentarem diferentes propriedades físico-químicas e biológicas, a interação com a energia eletromagnética incidente será diferenciada, assim é possível delimitar essas áreas e identificá-las.

Portanto, para diferenciar o plantio de bambu de outras vegetações e de alvos como área edificada, água e solo exposto, foram determinadas as Assinaturas Espectrais de cada alvo através do SCP. A fim de minimizar erros, para cada alvo (água, bambu, eucalipto etc.) foram selecionados 15 pontos de interesse (*pixels*), a partir dos quais foram definidas amostras por meio do método de crescimento de região, em que se consideram tanto a informação espectral do *pixel* quanto a dos seus vizinhos (definidos por um intervalo). Dessa forma obtiveram-se os respectivos perfis espectrais, conforme a Figura 9.

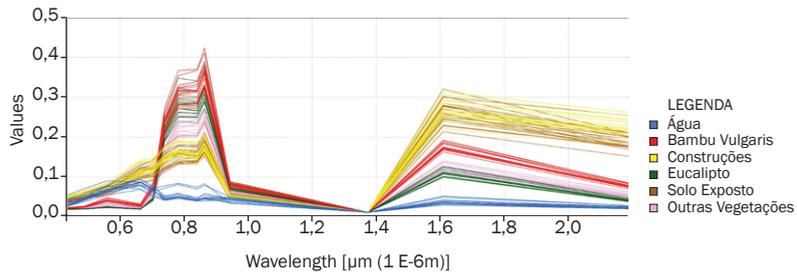


Figura 9 Assinatura Espectral, com todas as bandas: Refletância X Comprimento de Onda (μm).

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Segundo a Agência Espacial Europeia (2015), a banda 10 (Cirrus) do Sentinel-2 não contém informações da superfície, pois é utilizada para detecção de nuvens, com três valores definidos:

- 0 é um *pixel* sem nuvens;
- 1 é um *pixel* densa nuvem;
- 2 é um *pixel* de cirros.

Assim, devido à ausência de nuvens na imagem analisada, os valores de refletância de todos os alvos, no comprimento de onda referente a banda 10 (1.375 μm), foram zerados, o que torna a aplicação dessa banda desnecessária.

A banda 1 (0.433 μm) usada para a correção de aerossóis e a banda 9 (0,94 μm) usada para calibração de vapor de água, quando aplicadas a correção radiométrica, assim como a banda 10, detectam dados relacionados à situação atmosférica local. Portanto, foram omitidas da classificação supervisionada, pois não contribuem para a análise dos resultados do comportamento espectral dos alvos (Figura 10).

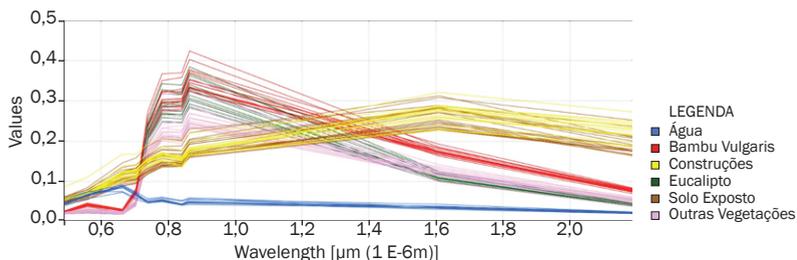


Figura 10 Assinatura Espectral, exceto bandas 1,9 e 10: Refletância x Comprimento de Onda (μm).

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

A partir do gráfico da Figura 10 é possível ver o comportamento típico dos objetos quanto à refletância em cada banda e seus respectivos comprimentos de onda. É possível perceber uma elevação da curva no caso dos objetos bambu, eucalipto e outras vegetações, mostrando o aumento de suas refletâncias em função dos comprimentos de onda nas bandas 5, 6 e 7 referentes ao *Red Edge* nos intervalos de 0,705 a 0,783 μm .

Entre os objetos de estudo referentes à vegetação, percebe-se ainda que o maior valor de refletância, em torno de 42%, é referente ao *Bambusa vulgaris* na banda NIR, enquanto o menor é apresentado pelas outras vegetações na banda vermelha, cerca de 1,75%. As porcentagens analisadas acima têm como parâmetro a refletância de 100% em cada comprimento de onda de um corpo branco ideal.

É possível notar que as assinaturas de construções e de solo exposto são muito parecidas, até mesmo na banda 8 (0.842 μm), correspondente ao infravermelho próximo, onde as assinaturas normalmente apresentam comportamentos distintos. Devido a essa semelhança, pode-se gerar uma classificação incorreta desses dois alvos.

Também percebe-se que na região visível (0.490 – 0.665 μm) as curvas dos objetos estão misturadas, em que é difícil distinguir as assinaturas de solo exposto, água e construções, e também não é clara a distinção entre as assinaturas de bambu, eucalipto e outras vegetações, principalmente na banda azul (0.490 μm).

As bandas 11 e 12 apresentam-se como uma boa opção para discriminação dos elementos estudados. Todas as superfícies estudadas apresentam-se bem diferenciadas, exceto o eucalipto, das outras vegetações que convergem um sobre o outro. No caso, pode-se dizer que a grande similaridade morfológica entre as espécies de eucalipto e da vegetação local torna difícil sua diferenciação no perfil espectral, que se explica na região do visível pela absorção do pigmento clorofila (verde) semelhante nas duas vegetações. Além disso, as bandas 11 e 12 correspondentes ao infravermelho de onda curta (*Short-wavelength Infrared* - SWIR) ajudam na estimativa do quanto de água está presente nas plantas, devido à relação inversa entre absorção e refletância, ou seja, quanto mais água absorvida, menos reflexão.

Tanto na Figura 9 quanto na Figura 10, nota-se que as assinaturas referentes ao mesmo alvo são levemente diferentes entre si, pois correspondem a amostras diferentes, e em um mesmo alvo podem ocorrer comportamentos diferentes devido a condições particulares; por exemplo, no caso das amostras de solo descoberto, pode-se dizer que existem grandes diferenças entre os tipos de solo, terra seca e úmida. As diferentes composições minerais da superfície são também refletidas na assinatura espectral.

A diferença na assinatura pode ser observada também na Figura 11, por meio das diversas tonalidades de vermelho e verde na composição de bandas 8-3-2, além da textura.

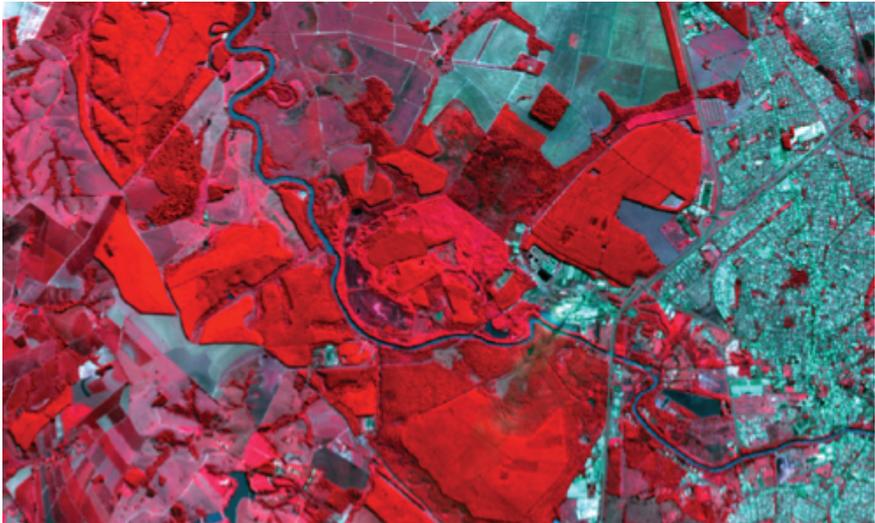


Figura 11 Visualização das bandas 8-3-2 em composição RGB.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Geralmente, a água reflete apenas na faixa da luz visível, e praticamente não reflete nas bandas de infravermelho próximo. A água distingue-se facilmente de outras superfícies, pois aparecem claramente delimitadas como áreas escuras, correspondentes a valores de *pixel* baixos em imagens registradas na gama de infravermelhos próximos. Entretanto, na Figura 11, a superfície de água correspondente ao Rio Mogi Guaçu, mesmo apresentando uma baixa refletância, não expressa a coloração esperada, pois o rio na data que a imagem foi capturada ainda estava afetado pela enxurrada de lama devido a deslizamento em Bom Repouso (MG) em 29 de março de 2016 (G1 SUL DE MINAS, 2016), o que interferiu no seu comportamento espectral, pois havia grande concentração de sedimentos.

Com base em amostras coletadas de cada tipo de objeto, foi realizada uma classificação supervisionada de toda a região (Figura 12), com o algoritmo de classificação de probabilidade máxima, para determinar áreas de cultivo de Bambu com base no seu comportamento espectral devido às suas propriedades físico-químicas e biológicas, portanto, sua refletância.



Figura 12 Resultado da classificação.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Para avaliar a precisão dessa classificação utilizou-se uma matriz de contingências, que permite identificar e quantificar erros de mapeamento.

A matriz de contingências compara a informação do mapa resultante da classificação, com dados de referência (isto é, dados verificados e validados no terreno), para um determinado conjunto de áreas de amostra. Dessa forma, é possível calcular a precisão global da classificação como a razão entre o número de amostras corretamente classificadas (soma da diagonal principal da matriz) e o número total de amostras (CONGALTON; GREEN, 2009 apud CONGEDO, 2016, p. 148). Essa é a estatística descritiva mais simples que se pode determinar a partir da tabela de contingências, e é geralmente designada por Percentagem de Elementos Corretamente Classificados (PECC).

Por meio do cálculo da tabela de contingências obteve-se um coeficiente Kappa $k=0,927$, que define uma força de concordância quase perfeita. Esse coeficiente varia entre 0 e 1, e quanto maior, melhor a qualidade da classificação. O resultado da classificação foi satisfatório, exceto pela confusão entre o solo exposto e a área urbana, como já analisado acima. O bambu foi individualizado com sucesso dos outros grupos de vegetações.

Para analisar a acurácia da classificação também foi utilizada a técnica de validação cruzada do tipo *holdout*. Essa técnica é utilizada para validação de uma classificação e consiste na divisão da base de dados em dois conjuntos, sendo um fornecedor dos dados (amostras) e o outro, de teste; assim, as áreas de teste não são identificadas durante a formação da base de dados, pois são usadas para testar a eficácia do acolhimento de amostras (BALDISSEROTTO, 2005). Obteve-se êxito na identificação das áreas de teste do estudo.

Na Figura 13 é possível identificar o resultado satisfatório da validação cruzada, pois apenas a região 1 foi utilizada como amostra, enquanto as regiões 2, 3 e 4 foram obtidas automaticamente.

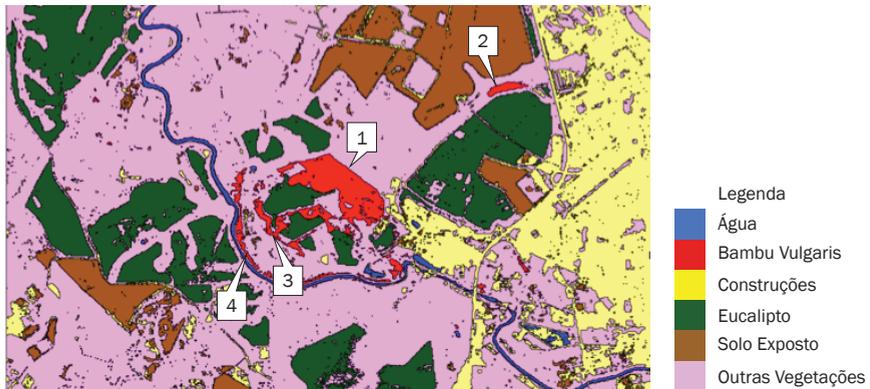


Figura 13 Validação Cruzada – holdout.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Essa separabilidade do bambu se deveu às suas características espectrais distintas dos alvos presentes na região analisada. Para analisar se o comportamento espectral obtido nesse estudo de caso corresponde ao apresentado normalmente por essa planta, foi realizada uma breve análise comparativa entre o comportamento obtido em um estudo realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa), onde as amostras analisadas são da espécie *Guadua angustifolia* em idades distintas (CARVALHO, 2009). A assinatura espectral do estudo em questão foi definida a partir de análise de imagens de satélite, assim como nesse estudo de caso, porém com as imagens obtidas pelo sensor MODIS, em período de estiagem.

A comparação entre as assinaturas espectrais tem como objetivo identificar comportamentos comum nas faixas do espectro, pois trata-se da mesma planta. No entanto, de espécies distintas, em idades distintas e muito certamente em condições climáticas e ambientais diferenciadas.

Devido aos satélites utilizados, as assinaturas espectrais apresentadas nas figuras 14 e 15 são ligeiramente diferentes, pois cada satélite possui bandas e intervalos espectrais diferentes.

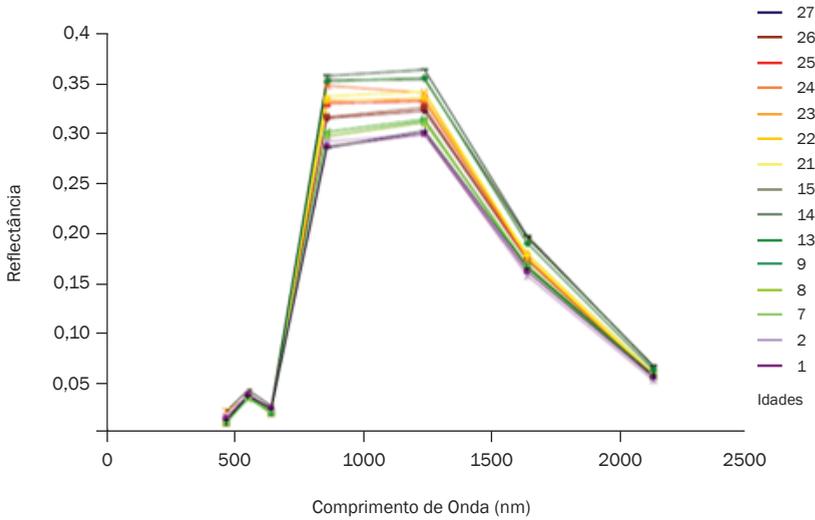


Figura 14 Assinatura Espectral - Bambu *Guadua angustifolia*.

Fonte: Carvalho (2009, p. 15).

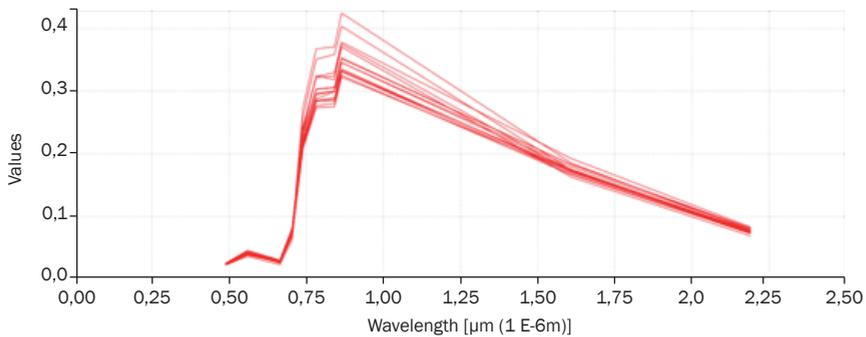


Figura 15 Assinatura Espectral Bambu *Bambusa vulgaris*.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

O principal diferencial entre as curvas é referente à presença da banda *Red Edge 8a* nas imagens do satélite Sentinel 2, que apresenta um pico de refletância na assinatura espectral na Figura 15, enquanto na Figura 14, nesse mesmo intervalo, há comporta-

mento linear. Sabe-se que as banda *Red Edge* são específicas para análises em vegetação, uso e ocupação do solo.

A proporção de clorofila é um parâmetro importante na discriminação de vegetações, pois influencia na refletância e transmitância das folhas, porém é afetado por outros aspectos da planta. Segundo Hatfield et al. (2008) esses comprimentos de onda, assim como o verde, evitam a saturação e a perda concomitante da sensibilidade para valores de clorofila, e são geralmente preferidos porque são mais sensíveis a moderados e altos teores de clorofila.

Portanto, conclui-se que foi possível, por meio da classificação com conhecimento prévio de uma área de bambu, determinar outras áreas da mesma espécie com acurácia de 92,7%, sem problemas com a proximidade de outras vegetações existentes na área. Conclui-se também que as bandas *Red Edge* possuem realmente sensibilidade a pigmentos vegetais superior à das bandas NIR e isso auxilia na diferenciação das espécies.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos são apenas exploratórios quanto à utilização na agricultura de precisão voltada para o plantio de bambu, mas permitem afirmar o potencial dessa aplicação para o estudo das características e comportamento dessa vegetação, conforme as variabilidades de espaço e tempo. O sensoriamento é uma ferramenta que pode contribuir para o manejo, sendo mais aplicado nas etapas de mapeamento e monitoramento, de onde são extraídas informações essenciais para atuação da agricultura de precisão.

A metodologia aplicada no primeiro estudo de caso possibilitou a determinação do resultado do índice de vegetação NDVI obtidos para um cultivo de bambu no município de Jacutinga (MG), por meio de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). Os valores obtidos por meio da Equação 1 apresentaram interpretações satisfatórias, no caso das imagens com correção atmosférica, que confirma sua influência no cálculo do NDVI, e conseqüentemente nas conclusões para a vegetação. Inicialmente a vegetação foi classificada com pouca folhagem e condição de certa carência de água e, após a correção, classifica-se a vegetação com folhas e adequada hidricamente, porém que não está na plenitude de suas funções metabólicas e fisiológicas.

Perante os estudos, destaca-se que o NDVI como indicador do estado apresentou resultados coerentes com a realidade, que podem contribuir em diagnósticos ambientais. A análise e utilização dessas informações deve ser criteriosa, no qual devem ser considerados outros aspectos, pois esse índice considera apenas o comportamento es-

pectral do alvo de interesse, nas bandas vermelho e infravermelho próximo, que não permite uma discretização das vegetações, apenas verificação do seu estado. Sabe-se ainda que o NDVI tem influência significativa do efeito espectral do solo. Portanto, uma alternativa para uma distinção de vegetações é a consideração conjunta de cada faixa do espectro, através de uma classificação representada graficamente pela assinatura espectral.

Assim, no segundo estudo de caso, a partir de amostras de diferentes objetos presentes na imagem de satélite, geraram-se as assinaturas espectrais dos objetos a fim de que fosse realizada uma distinção entre eles, principalmente entre o bambu e outras vegetações. Esse processo foi feito para extrair informações do comportamento espectral do objeto e para que houvesse uma individualização coerente dos objetos e possível identificação de outras áreas de cultivo do bambu.

Esse estudo focou na forma de utilizar as bandas e na adição ou não dessas, concluindo-se que as bandas Cirrus, Aerossol e Vapor d'água não possuem informações quanto à superfície e não contribuem para a classificação supervisionada, além de alterar as assinaturas espectrais e levar a conclusões incoerentes sobre as vegetações, por exemplo.

Para verificar se a caracterização espectral realizada possui concordância, utilizou-se o cálculo da matriz de contingências que retornou o coeficiente Kappa $k= 0,927$, que define força de concordância quase perfeita; portanto, conclui-se que houve uma classificação satisfatória, pois 92,7% dos pares de observações são concordantes.

Como já esperado, pequenas áreas de construção foram classificadas como solo exposto, e vice-versa, devido à semelhança no comportamento espectral desses dois alvos.

As bandas *Red Edge* presentes nas imagens Sentinel-2 são mais sensíveis quanto à refletância dos pigmentos vegetais, e isso auxilia na diferenciação das vegetações e outros objetos. Enquanto nas bandas correspondentes ao SWIR, que ajudam na estimativa do quanto de água está presente nas plantas, devido à diferenciação nas feições de absorção da água, houve uma melhor delimitação das curvas das plantações; portanto, individualização clara entre o bambu e o eucalipto e entre bambu e outras vegetações.

Com a finalidade de caracterizar o padrão espectral do bambu realizou-se uma comparação entre as assinaturas espectrais do bambu *Guadua angustifolia* (obtido em um estudo realizado pelo INPA) e o bambu *Bambusa vulgaris*, objeto desse estudo.

O padrão apresentado para as duas espécies, mesmo que com idades diferentes, é semelhante, exceto pela presença da banda *Red Edge*, que causou um pico de refletância, por ser mais sensível aos pigmentos vegetais.

Conclui-se que é possível considerar o formato do traçado da assinatura típica para bambu verde sadio em período de estiagem.

Recomenda-se, para continuação das pesquisas, estudos referentes ao cálculo NDVI modificado para banda *Red Edge*, comparação de análises feitas com imagens de diferentes resoluções (Landsat, Sentinel-2, Drones etc.), influência da precipitação na

classificação NDVI para as vegetações, análise da diferença nos valores do NDVI para plantações adubadas e não adubadas, e análise de outros índices de vegetação.

REMOTE SENSING APPLIED TO PRECISION FARMING IN BAMBOO CULTIVATION

Abstract

This article illustrates how geoprocessing and spectral behavior of vegetation can help in agriculture. Precision farming uses techniques that provide great benefits as productivity and crop quality, directly affecting the profitability and rural economic development. The study aims to verify the application of remote sensing techniques for bamboo plantations, presenting the theoretical and practical aspects adopted to growing regions. Satellite images are analyzed by the software QGIS 2.14.4 as the vegetation index and the spectral signature for determining the condition of the plant and determination growing areas. The results show that the use of atmospheric correction is essential to analyze the results of vegetation indexes. For the spectral signature was noted that different species of bamboo have similar spectral behavior and its individualization front of other objects present in the study area was carried out more adequately in the infrared shortwave.

Keywords: Precision farming. Spectral behavior. Vegetation indexes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA (ESA). *Introduzindo o Sentinel-2*. [2015]. Disponível em: <https://translate.google.com.br/translate?hl=ptBR&sl=en&u=http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2&prev=search>. Acesso em: 15 set. 2016.

ANDRADE, R.; DELARCO SANCHES, I.; VICTORIA, D. de C.; FURTADO, A. L. dos. Análise de metodologias para correção atmosférica e estimativa do albedo da superfície usando imagens Landsat 5, TM. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 3., 2010, Cáceres. *Anais...* Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: Inpe, 2010. p. 133-141.

BALDISSEROTTO, C. *Técnicas de aprendizagem de máquina para previsão de sucesso em implantes dentários*. 2005. 60 f. TCC (Graduação de Engenharia de Computação)–Departamento

de Sistemas Computacionais, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2005. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/10973496-Tecnicas-de-aprendizagem-de-maquina-para-previ-sao-de-sucesso-em-implantes-dentarios.html>>. Acesso em: 19 ago. 2016.

BORBA, M. *Governo Federal aprova política nacional do bambu para erradicar pobreza*. 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/7273-governo-federal-aprova-politica-nacional-do-bambu-para-erradicar-pobreza>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

BRASIL. INSA - INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. 2014. Disponível em: <<http://sigsab.insa.gov.br/ndv>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

BRASÍLIA. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agricultura de Precisão. *Agricultura*, Brasília, n. 3, p. 3-36, 2013. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agricultura-Precisao/Boletim Técnico - Agricultura de Precisão 2013.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agricultura-Precisao/Boletim_Tecnico_-_Agricultura_de_Precisao_2013.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2013.

CARVALHO, A. L. de. *Ciclo de vida de populações de bambu (Guadua Spp.) no tempo e no espaço, no sudoeste da Amazônia*. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

CONGEDO, L. Semi-automatic classification plugin documentation: Versão 5.0.13.1. [s. l.]: [s. n], 2016. Disponível em: <<https://media.readthedocs.org/pdf/semiautomaticclassification-manual-v5-pt/latest/semiautomaticclassificationmanual-v5-pt.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2016.

FLORENZANO, T. G. *Iniciação em sensoriamento remoto*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 128 p. Disponível em: <http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o_em_Sensoriamento_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC>. Acesso em: 17 ago. 2016.

FURIAN, P. H. *Espectro eletromagnético*. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

G1 SUL DE MINAS (Minas Gerais). (Ed.). *Lama do Rio Mogi Guaçu preocupa moradores em Ouro Fino*, MG. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2016/04/lama-do-rio-mogi-guacu-preocupa-moradores-em-ouro-fino-mg.html>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

HATFIELD, J. L.; GITELSON, A. A.; SCHEPERS, J. S.; WALTHALL, C. L. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, v. 100, n. Supplement_3, p. S-117, 2008.

KORTE, G. *Bambu-agroindústria sustentável*. Brasília: Associação Brasileira dos Produtores de Bambu, 2016. 30 slides, color. Disponível em: <<http://www.iica.org.br/download/GuilhermeKorte.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

PRATES, I. Utilização de imagens LANDSAT-8 para caracterização da cobertura vegetal. 2014. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2014/06/10/processamento-digital-de-imagens-landsat-8-para-obtencao-dos-indices-de-vegetacao-ndvi-e-savi-visando-a-caracterizacao-da-cobertura-vegetal-no-municipio-de-nova-lima-mg/>>. Acesso em: 1º set. 2016.

REDAÇÃO GLOBO RURAL. *O que é agricultura de precisão?* 2015. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Tecnologia-no-Campo/noticia/2015/12/o-que-e-agricultura-de-precisao.html>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, 1973. *Proceedings...* Whashington: Nasa, 1974, v. 1, p. 309-317, 1973.

RUDORFF, B. F. T. *Produtos de sensoriamento remoto*. [s. d.]. Disponível em: <<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>> Acesso em: 23 ago. 2016.

SANTI, T. Bambu para toda obra. *O Papel*, [s. l.], v.76, n. 4, p. 23-34, abr. 2015. Mensal.

STEFFEN, C. A. *Introdução ao sensoriamento remoto*. [s. d.]. Disponível em: <<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 20 out. 2016.

VENTURIERI, A. *Curso de Introdução às Técnicas de Sensoriamento Remoto*. Belém: [s. n.], 2007. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/epdir/images/docs/paper64.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2016.

Contato

Sergio Vicente Denser Pamboukian
sergio.pamboukian@mackenzie.br

Tramitação

Recebido em novembro de 2016.
Aprovado em janeiro de 2017.