

DISCRIMINAÇÃO DE VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR COM DADOS HIPERESPECTRAIS DO SENSOR HYPERION/EO-1

Discrimination of sugarcane varieties with hyperspectral data from the Hyperion/EO-1 sensor

Lênio Soares Galvão
Antônio Roberto Formaggio
Daniela Arnold Tisot

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Divisão de Sensoriamento Remoto

Avenida dos Astronautas, 1718, Caixa Postal 515, 12245-970, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
{lenio, formag, dtisot}@dsr.inpe.br

RESUMO

Dados de alta resolução espectral coletados pelo sensor Hyperion/EO-1 foram convertidos para imagens de reflectância de superfície e testados quanto à discriminação de cinco variedades brasileiras de cana-de-açúcar. As relações entre alguns índices espectrais e os fatores responsáveis pela variabilidade espectral registrada nos dosséis foram discutidos. Para fins de discriminação, análise discriminante múltipla foi aplicada com as seguintes variáveis submetidas a um processo de seleção passo-a-passo: valores de reflectância das bandas, razões de reflectância das bandas e vários índices espectrais sensíveis às variações no conteúdo de clorofila, água das folhas e lignina-celulose. Os resultados obtidos demonstraram que a variedade SP80-1842 apresentou uma reflectância menor do que as demais, o que facilitou sua discriminação na imagem. A discriminação das outras quatro variedades (RB72-454, SP80-1816, SP81-3250 e SP87-365), que possuem valores de reflectância similares, foi feita com análise discriminante. Esta técnica produziu uma exatidão de classificação de 87,5% para um conjunto independente de pixels. Erros de classificação de alguns talhões ocorreram principalmente para variedades que apresentaram valores maiores de desvio-padrão em sua resposta espectral. Para um dado cultivar, esta variabilidade espectral não pôde ser explicada pela influência de um único fator como tipo de solo, corte da cana ou práticas locais de manejo da cultura. A comparação entre os dados de campo e os dados resultantes da classificação das imagens por análise discriminante demonstrou o potencial dos dados coletados pelo sensor Hyperion e da abordagem metodológica proposta para diferenciar variedades de cana-de-açúcar no sudeste brasileiro.

Palavras chaves: Sensoriamento remoto hiperespectral, variedades de cana-de-açúcar, Hyperion.

ABSTRACT

High spectral resolution data collected by the Hyperion/EO-1 instrument were converted into surface reflectance images and evaluated for the discrimination of five Brazilian sugarcane varieties. The relationships between some spectral indices and the causes of spectral variability from the sugarcane canopies were discussed. For discrimination purposes, multiple discriminant analysis was applied over the following set of variables submitted to a stepwise selection procedure: band reflectance values, ratios of reflectance, and several spectral indices potentially sensitive to changes in chlorophyll, leaf water and lignin-cellulose. Results showed that the cultivar SP80-1842 presented the lowest reflectance values, which facilitated discrimination from the remaining varieties. Discrimination between the other four varieties (RB72-454, SP80-1816, SP81-3250, and SP87-365) with similar reflectance required discriminant analysis, which produced an overall classification accuracy of 87.5% for a hold-out set of pixels. Misclassification of some sugarcane plantations was associated with varieties that presented the highest standard deviation values in their spectral response. For a given cultivar, such variability was not produced by single factor such as soil type, sugarcane cutting or in farm management practices. The comparison of ground truth data with the discriminant-derived classification image confirmed the potential of the Hyperion data and of the proposed approach to differentiate sugarcane varieties in southeastern Brazil.

Keywords: Hyperspectral remote sensing, sugarcane varieties, Hyperion.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, assim com em outros países produtores de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*), variedades têm sido continuamente desenvolvidas e testadas com os objetivos de aumentar a produtividade, obter uma maior resistência às pragas e doenças e uma melhor adaptação às variações de clima, tipos de solos, técnicas de corte ou manejo. Esta cultura agrícola possibilita a produção de açúcar e de álcool, sendo importante fonte de energia renovável, aspecto relevante quanto à questão de sustentabilidade ambiental.

As pesquisas relativas à utilização do sensoriamento remoto em áreas de cana-de-açúcar têm abordado questões importantes como classificação e mapeamento (TARDIN *et al.*, 1992), manejo (WIEGAND *et al.*, 1996; YANG *et al.*, 1997; FIORIO *et al.*, 2000) e estimativa de produtividade (RUDORFF E BATISTA, 1990). A maior parte das pesquisas para testar a discriminação de variedades de cana-de-açúcar com sensoriamento remoto tem utilizado dados multiespectrais. Por exemplo, no Brasil, JOAQUIM (1998) e FORTES (2003) utilizaram dados dos sensores TM (Thematic Mapper)/Landsat-5 e ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus)/Landsat-7 para a identificação de variedades de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Entretanto, pesquisas relativas à utilização de dados hiperespectrais para a discriminação de variedades de cana-de-açúcar são praticamente inexistentes na literatura.

O sensor hiperespectral Hyperion (242 bandas), a bordo do satélite Earth Observing-1 (EO-1), lançado em 1999, oferece a possibilidade de testar o uso desta tecnologia para a diferenciação de variedades de cana-de-açúcar. O uso deste instrumento (ou de similares) possibilita a aquisição de dados com resolução espectral suficiente para reconstituir bandas de absorção nos espectros dos pixels relacionadas com conteúdos de clorofila, água nas folhas e de lignina/celulose, que podem ser parâmetros importantes na diferenciação das variedades de cana. Segundo APAN *et al.* (2004), índices que utilizam bandas estreitas, propostos a partir dos dados hiperespectrais coletados pelo sensor Hyperion, podem ser utilizados para a detecção de doenças em canaviais da Austrália. Para tal finalidade, os autores destacaram a importância do uso de dados do infravermelho de ondas curtas (1600nm) na formulação dos índices.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o uso potencial de dados hiperespectrais coletados pelo sensor Hyperion, em uma área de estudo localizada no Estado de São Paulo, para a discriminação de cinco variedades de cana-de-açúcar (RB72-454, SP80-1816, SP80-1842, SP81-3250 e SP87-365). As relações entre alguns índices espectrais e sua variabilidade nos dosséis são discutidas.

2. METODOLOGIA

A Figura 1 mostra a localização da área de

estudo (7,6km por 46km), que está localizada ao Sul da cidade de Franca (SP) entre as seguintes coordenadas: 47°25'46''W - 20°32'52''S (canto superior esquerdo) e 47°27'10''W - 20°58'41''S (canto inferior direito). Os dados hiperespectrais foram coletados em 16 de julho de 2002, época do pico de colheita da cana-de-açúcar, em 242 bandas (10nm de largura) posicionadas no intervalo de 356nm a 2577nm. Entretanto, apenas dados de 198 bandas foram fornecidos radiometricamente calibrados. A resolução espacial é de 30 metros.

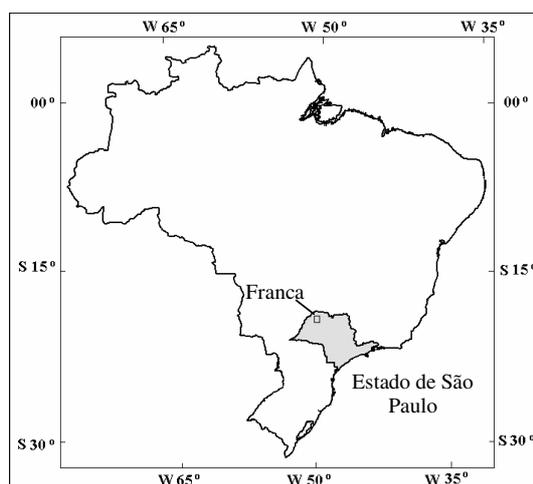


Fig. 1 – Localização da área de estudo no Estado de São Paulo, município de Franca.

Os dados de radiância foram convertidos para valores de reflectância de superfície, portanto corrigidos dos efeitos de espalhamento e absorção atmosférica, com o uso do aplicativo ACORN (Atmospheric Correction Now), que tem como base o modelo de transferência radiativa MODTRAN4 (IMSPEC, 2001). O modelo atmosférico utilizado foi tropical/continental com 50km de visibilidade. A técnica Fração Mínima de Ruído (Minimum Noise Fraction) foi aplicada sobre as imagens de reflectância de superfície para minimização de ruídos (GREEN *et al.*, 1988; APAN *et al.*, 2004). Bandas posicionadas em torno de 1400nm e 1900nm foram excluídas da análise subsequente de dados, devido à forte absorção atmosférica pelo vapor de água, que limita o uso destes dados mesmo após correção atmosférica.

Informações sobre a ocorrência espacial das cinco variedades de cana-de-açúcar estudadas (RB72-454, SP80-1816, SP80-1842, SP81-3250 e SP87-365) foram fornecidas pela Usina Batatais, localizada na área de estudo. A partir das imagens de reflectância de superfície, foram selecionados 200 pixels (40 pixels/variedade e 5 variedades) para caracterizar a resposta espectral de cada variedade.

Visando diferenciar as variedades com maior similaridade espectral, análise discriminante múltipla foi aplicada, considerando como possíveis variáveis discriminatórias: a) valores de reflectância das bandas; b) razões de bandas; c) índices espectrais potencialmente sensíveis às variações de clorofila, água

das folhas e lignina/celulose (Tabela 1).

Além dos índices relacionados na Tabela 1, foram ainda considerados: 1) a profundidade das bandas de absorção posicionadas em 671nm (clorofila), 983nm e 1205nm (água das folhas), 2103nm e 2304nm (lignina-celulose), calculadas pixel-a-pixel pelo método do contínuo espectral (CLARK E ROUSH, 1984); 2) a posição da borda vermelha, indicada pela primeira derivada dos espectros, usando o método de Savitzky-Golay (TSAI E PHILPOT, 1998).

TABELA 1 – ÍNDICES ESPECTRAIS COM VALORES DE REFLECTÂNCIA (R) DE BANDAS ESTREITAS DO SENSOR HYPERION.

Índices	Equações	Referências
Disease Water Stress Index (DSWI)	$(R_{803nm} + R_{549nm}) / (R_{1659nm} + R_{681nm})$	Apan <i>et al.</i> (2004)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)	$[(R_{701nm} - R_{671nm}) - 0,2(R_{701nm} - R_{549nm})] \times (R_{701nm} / R_{671nm})$	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(R_{864nm} - R_{671nm}) / (R_{864nm} + R_{671nm})$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Normalized Difference Water Index (NDWI)	$(R_{864nm} - R_{1245nm}) / (R_{864nm} + R_{1245nm})$	Gao (1996)
Leaf Water Vegetation Index (LWVI-1)	$(R_{1094nm} - R_{983nm}) / (R_{1094nm} + R_{983nm})$	Galvão <i>et al.</i> (2005)
Leaf Water Vegetation Index (LWVI-2)	$(R_{1094nm} - R_{1205nm}) / (R_{1094nm} + R_{1205nm})$	Galvão <i>et al.</i> (2005)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$(R_{529nm} - R_{569nm}) / (R_{529nm} + R_{569nm})$	Gamon <i>et al.</i> (1992)
Red-Edge Vegetation Stress Index (RVSI)	$((R_{712nm} + R_{752nm}) / 2) - R_{732nm}$	Merton e Huntington (1999)

Em comparação com outras técnicas, análise discriminante foi usada no trabalho para reduzir a dimensionalidade dos dados e possibilitar a subsequente classificação da imagem, buscando maximizar a separação dos grupos (variedades). Um procedimento passo-a-passo, que procura maximizar a Distância de Mahalanobis entre os grupos mais similares, foi utilizado para selecionar um subconjunto de variáveis e produzir uma função discriminante adequada. Valores de probabilidade de *F* foram usados como critério para a inclusão (0,05) e remoção (0,10) das variáveis.

Um conjunto de pixels (20 para cada variedade) não utilizado na obtenção da função discriminante foi testado para fins de classificação. Escores discriminantes também foram calculados pixel-a-pixel para a subsequente classificação da imagem com base na Distância Euclidiana dos pixels para o centróide dos grupos (valores médios dos escores de cada grupo). Uma máscara foi utilizada para comparar os resultados da classificação com os dados de campo.

Coefficientes de correlação entre alguns índices usados no trabalho foram calculados. A variabilidade espectral dos dados foi discutida em função de fatores como: arquitetura do dossel, tipo de solo e corte da cana. A localização dos talhões nas fazendas foi utilizada para avaliar a possível influência de práticas

locais de manejo da cana sobre sua resposta espectral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Reflectância Espectral das Variedades de Cana-de-Açúcar

A Figura 2 mostra as curvas espectrais médias das cinco variedades de cana-de-açúcar estudadas, obtidas a partir dos dados coletados pelo sensor Hyperion. Em geral, as maiores diferenças nos valores médios de reflectância das variedades podem ser observadas nas faixas espectrais do infravermelho próximo (750-1300nm), do visível, na transição do verde para o vermelho (550-690nm), e do infravermelho de ondas curtas (1500-1750nm).

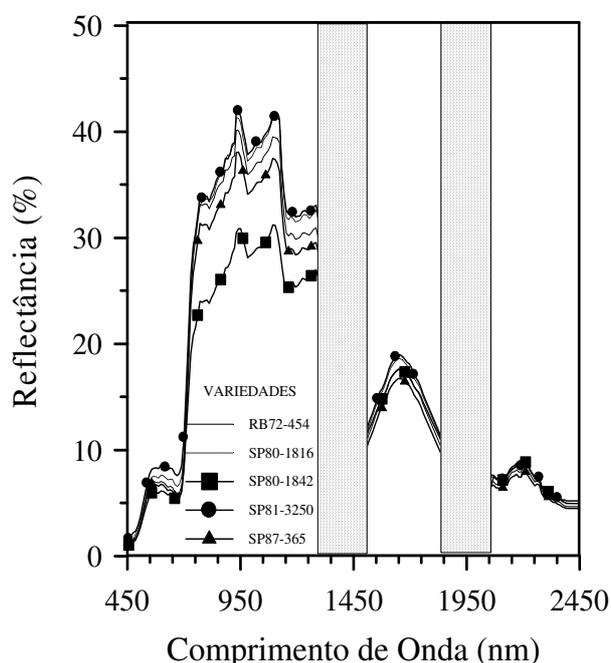


Fig. 2 - Espectros de reflectância média das cinco variedades de cana-de-açúcar estudadas (40 pixels por variedade).

Conforme visto na Figura 3, a variedade SP80-1842 apresentou valores médios de reflectância menores nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo do que as demais variedades. Os maiores valores de desvio-padrão para estas duas bandas foram observados para as variedades SP80-1816 e SP81-3250. As variedades que apresentaram uma variabilidade espectral menor foram SP80-1842 e SP87-365.

3.2 Fatores Responsáveis pela Variabilidade Espectral dos Dosséis

A transição da variedade de baixa reflectância (SP80-1842) para as variedades de alta reflectância (p.ex., SP81-3250) coincide com a mudança na arquitetura do dossel, que tende a ser mais erectófilo para a variedade SP80-1842. De acordo com JACKSON

E PINTER (1986) e PINTER *et al.* (1985), dosséis mais erectófilos tendem a ter reflectância menor do que dosséis planófilos.

De acordo com a Figura 4, a variedade SP80-1842 também exibe bandas de absorção mais profundas em 2304nm (lignina-celulose) e bandas de absorção mais rasas em 1205nm (água das folhas). Em termos espectrais, este padrão sugere que uma quantidade maior de vegetação não-fotossinteticamente ativa foi detectada pelo sensor Hyperion nos dosséis da variedade SP80-1842.

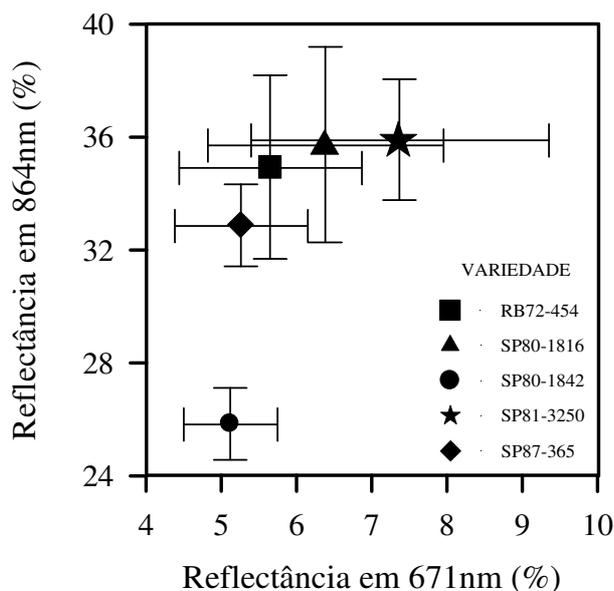


Fig. 3 – Reflectância média e desvio-padrão das variedades de cana-de-açúcar em duas bandas do sensor Hyperion posicionadas nas faixas do vermelho (671nm) e do infravermelho próximo (864nm).

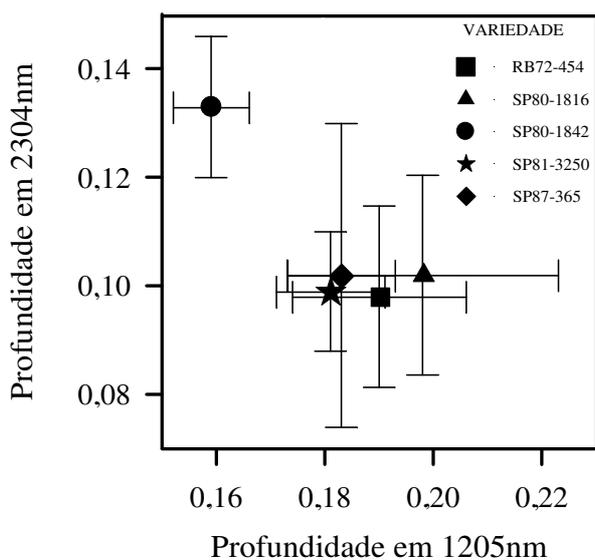


Fig. 4 – Valores médios e desvio-padrão da profundidade das bandas de absorção centradas em 1205nm e 2304nm, em função da variedade de cana-de-açúcar.

Portanto, a resposta espectral comparativamente menor da variedade SP80-1842 pode estar associada a diferenças na arquitetura do dossel. Dosséis mais erectófilos favorecem os efeitos de sombreamento mútuo dos componentes do dossel, além de uma maior absorção interna da radiação neles incidente. Por outro lado, esta arquitetura também favorece a detecção pelo sensor de constituintes não-fotossinteticamente ativos no interior do dossel como palha, colmos e nós.

Para analisar a influência potencial de outros fatores sobre a variabilidade espectral dos cultivares, a Figura 5a mostra a relação entre os valores de profundidade da banda de absorção posicionada em 1205nm (água das folhas) e os da reflectância da banda do infravermelho próximo centrada em 864nm (espalhamento do dossel). A Figura 5b ilustra a relação entre os valores de profundidade da banda de absorção posicionada em 2304nm (lignina-celulose) e os de NDVI. Nas Figuras 5a e 5b, os resultados são apresentados em função do tipo de solo e das fazendas onde se situam os talhões, respectivamente. Neste último caso, conforme mencionado anteriormente, o objetivo foi avaliar a possível influência de práticas locais de manejo da cana sobre sua resposta espectral. Os resultados da Figura 5 referem-se apenas à variedade SP80-1816, que mostrou maior variabilidade espectral na Figura 3.

Na Figura 5a, o valor positivo de correlação obtido ($r = +0,81$) reflete o fato de que a transição de dosséis menos vigorosos (presença de palha ou componentes secos no interior do dossel) para mais vigorosos (predomínio de folhas verdes) tende a produzir uma quantidade maior de espalhamento da radiação no infravermelho próximo (p. ex., 864nm) e bandas de absorção mais profundas em comprimentos de onda específicos (p. ex., 1205nm) oriundas do conteúdo de água das folhas verdes. Na Figura 5b, o valor negativo de correlação obtido ($r = -0,70$) indica que esta transição produz um aumento no valor de NDVI e uma diminuição no valor de profundidade da banda de absorção centrada em 2304nm. Feições espectrais de lignina-celulose, centradas em 2103nm e 2304nm, tendem a ser mais bem definidas ou ter bandas de absorção mais profundas em espectros de vegetação não-fotossinteticamente ativa, o que é consistente com os resultados obtidos.

De acordo com a Figura 5, a variabilidade espectral associada com a variedade SP80-1816 na área de estudo não apresentou tendência bem definida em função de fatores como tipo de solo ou manejo de cana. O mesmo ocorreu quando o corte da cana foi considerado na análise (resultados não apresentados). De fato, a variabilidade espectral é dependente da variedade de cana-de-açúcar sob análise e da influência conjunta de suas características agrônomicas. Estas características podem incluir, além dos fatores anteriormente mencionados, aspectos relacionados com a arquitetura e o fechamento do dossel; o grau de retenção de folhas secas; a largura, tamanho e

aquecimento das folhas; o estresse hídrico; as pestes e doenças. A influência espectral de cada fator é de difícil avaliação.

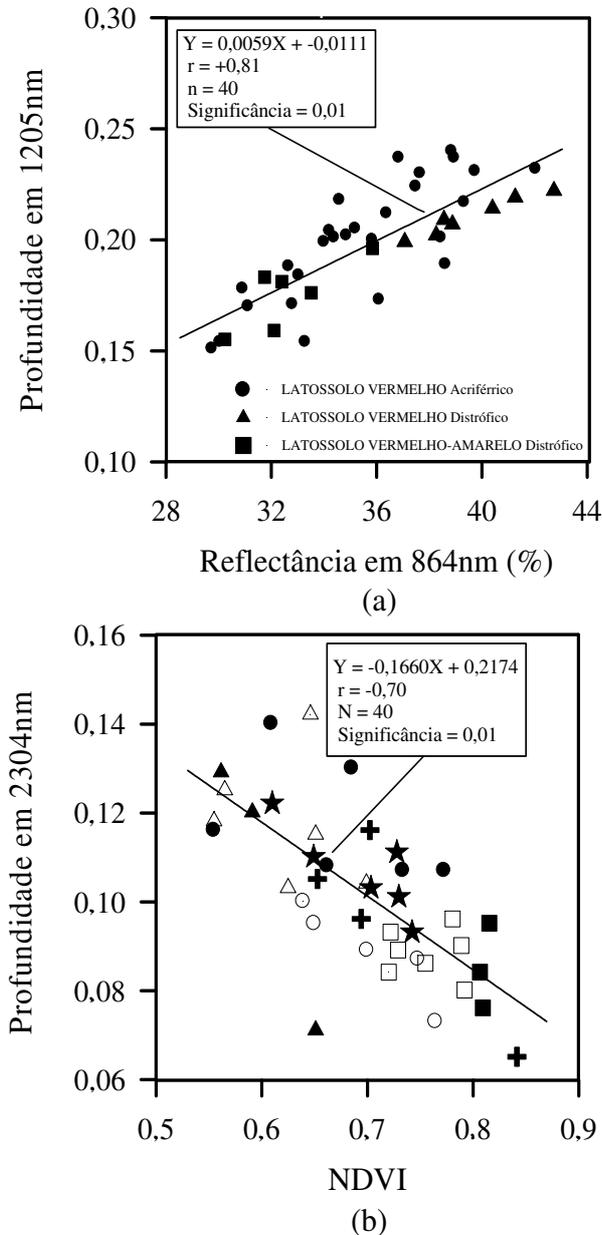


Fig. 5 – (a) Relações entre a profundidade da banda de absorção centrada em 1205nm e os valores de reflectância da banda do sensor Hyperion posicionada em 864nm, em função do tipo de solo; (b) Relações entre a profundidade da banda de absorção centrada em 2304nm e os valores de NDVI, em função da localização dos talhões em diferentes fazendas (símbolos). Em ambas as figuras, os resultados foram apresentados apenas para a variedade SP80-1816.

3.3 Discriminação das Variedades de Cana-de-Açúcar

Conforme ilustrado na Figura 3, a variedade SP80-1842 apresentou valores menores de reflectância no infravermelho próximo do que as demais variedades.

Ela também mostrou bandas de absorção mais rasas em 1205nm (água das folhas) e mais profundas em 2304nm (lignina-celulose) do que as outras variedades (Figura 4). Portanto, na área de estudo, uma forma simples de diferenciar a variedade SP80-1842 das demais variedades é um utilizar um limiar para identificar pixels com valores de reflectância inferiores a 30% na banda do sensor Hyperion posicionada em 864nm nas áreas plantadas com cana-de-açúcar.

A discriminação entre as outras quatro variedades, que são espectralmente similares, requereu uma abordagem estatística que teve como base análise discriminante múltipla. No presente trabalho, as seguintes variáveis foram selecionadas para compor uma função discriminante capaz de diferenciar estas variedades: a) os valores de reflectância das bandas posicionadas em 651nm, 722nm, 813nm, 1084nm, 1124nm, 1649nm, e 2002nm; b) as razões de reflectância 2355/2052nm, 1750/478nm, 1750/569nm, e 1255/478nm; c) a profundidade das bandas de absorção centradas em 671nm (clorofila), 983nm (água das folhas) e 2304nm (lignina-celulose); os índices NDWI e DSWI.

A verificação da eficiência da função discriminante para diferenciar as variedades foi feita com um novo conjunto de pixels (20 por variedade). Os resultados de exatidão de classificação obtidos foram: RB72-454 (90%), SP80-1816 (80%), SP81-3250 (90%) e SP87-365 (90%). A exatidão total de classificação foi de 87,5%.

O desempenho da função discriminante pode ser avaliado de forma espacializada na Figura 6. A Figura 6a mostra uma composição colorida falsa-cor com as imagens das bandas do sensor Hyperion, centradas em 864nm, 1649nm e 2204nm, representadas nas cores vermelha, verde e azul, respectivamente. As áreas mais claras com cores ciano representam palhadas resultantes da colheita de cana-de-açúcar. As plantações de cana apresentam cores avermelhadas em diferentes tonalidades, que refletem a presença, em muitos casos, de variedades distintas.

As Figuras 6b e 6c possibilitam a comparação da verdade de campo com a classificação resultante da análise discriminante. A Figura 6b mostra uma imagem apenas com a indicação das plantações de cana com informações de campo disponíveis sobre as variedades, na época de aquisição dos dados Hyperion. A Figura 6c mostra os resultados de classificação oriundos do uso da distância mínima dos escores discriminantes para os centróides dos grupos (variedades). Na Figura 6c, áreas onde ocorre a variedade SP80-1842, identificada com o uso de um limiar de reflectância no infravermelho próximo, também foram indicadas.

Em geral, os resultados da Figura 6 confirmam o bom desempenho da função discriminante e dos dados hiperespectrais na discriminação das variedades. Os melhores resultados de exatidão de classificação foram obtidos para as variedades SP87-365 (96%) e RB72-454 (86%), que apresentaram uma variabilidade menor, no espaço espectral da Figura 3, do que as outras duas

variedades (SP81-3250 e SP80-1816). Por outro lado, as variedades SP81-3250 e SP80-1816 mostraram valores de exatidão de classificação de 73% e 76%,

respectivamente, portanto, inferiores aos obtidos com o conjunto separado de pixels.

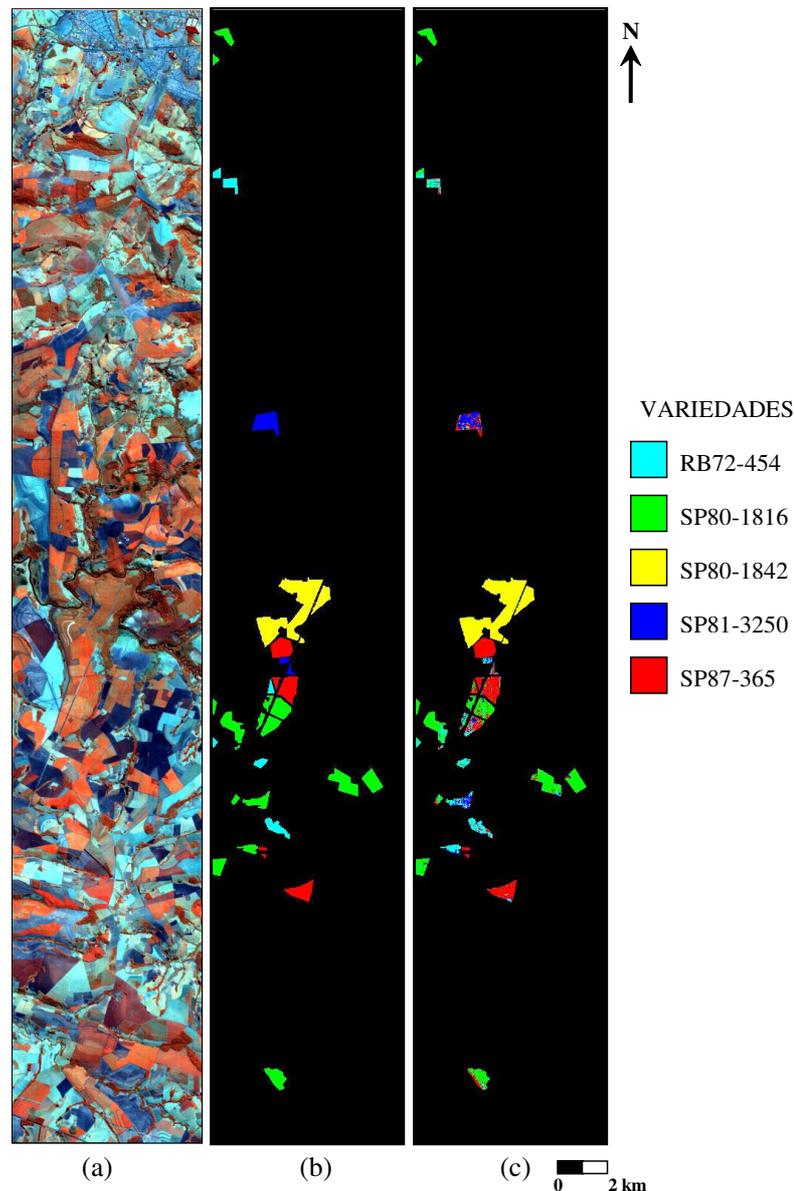


Fig. 6 – (a) Composição colorida falsa-cor com as bandas do sensor Hyperion centradas em 864nm, 1649nm e 2204nm representadas em vermelho, verde e azul, respectivamente; (b) Distribuição espacial das cinco variedades de cana-de-açúcar estudadas (verdade de campo); (c) Classificação resultante da análise discriminante.

4. CONCLUSÕES

Na área de estudo, a variedade SP80-1842 apresentou valores menores de reflectância no infravermelho próximo, bandas de absorção mais profundas em 2304nm (lignina-celulose) e bandas de absorção mais rasas em 1205nm (água das folhas) do que as demais variedades. A discriminação da variedade SP80-1842 foi feita com o uso de um limiar para detectar pixels com valores de reflectância inferiores a 30% em 864nm.

A discriminação das outras quatro variedades

(RB72-454, SP80-1816, SP81-3250 e SP87-365) foi feita com análise discriminante, usando valores de reflectância das bandas do sensor Hyperion, razões de reflectância e índices espectrais potencialmente sensíveis às variações no conteúdo de clorofila, água das folhas e lignina-celulose. Esta técnica foi eficaz para reduzir a alta dimensionalidade dos dados hiperespectrais, selecionando um subconjunto de variáveis com capacidade de discriminação mais alta. Os melhores resultados de classificação foram obtidos para as variedades SP87-365 e RB72-454, que apresentaram uma menor variabilidade espectral.

Na área de estudo, a influência isolada de fatores como tipo de solo, corte da cana e práticas locais de manejo para explicar a variabilidade espectral nos dosséis de cana não foi detectada. A variabilidade é provavelmente resultante da ação conjunta de diversos fatores, os quais são de difícil avaliação.

No presente trabalho, melhores resultados de classificação podem ser obtidos com uma amostragem mais ampla das variedades que exibem maior variabilidade espectral. Entretanto, isto não implica necessariamente em um melhor desempenho de classificação das funções discriminantes quando utilizadas em outras áreas de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Usina Batatais e à Copersucar União por fornecerem dados essenciais para realização desta pesquisa. Gostaríamos também de agradecer à Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI - Escritório Regional Agrícola de Franca), especialmente ao Engenheiro Márcio Fonseca Reis por sua assistência nas atividades de campo. Agradecimentos também são devidos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e aos revisores anônimos pelas sugestões feitas para a melhoria do texto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n. 2, p. 489-498, 2004.
- CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v.89, n. 7, p. 6329-6340, 1984.
- DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; COLSTOUN, E. B.; McMURTREY, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.74, n. 2, p. 229-239, 2000.
- FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; SPAROVEK, G. Cronologia e impacto ambiental do uso da terra na microbacia hidrográfica do Ceveiro, em Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n. 4, p. 671-679, 2000.
- FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), 2003. 131p.
- GAMON, J. A.; PENUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v.41, n. 1, p. 35-44, 1992.
- GAO, B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, n. 3, p. 257-266, 1996.
- GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v.94, n. 4, p. 523-534, 2005.
- GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26, n. 1, p. 65-74, 1988.
- IMSPEC. **ACORN™ user's guide**. Boulder, CO, Analytical Imaging and Geophysics. Boulder, CO, 2001. 64p.
- JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.20, n. 1, p. 43-56, 1986.
- JOAQUIM, A. C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara – SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1998. 118p.
- MERTON, R.; HUNTINGTON, J. Early simulation of the ARIES-1 satellite sensor for multi-temporal vegetation research derived from AVIRIS. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 8, 9-11 February, 1999, Pasadena, USA. **Proceedings**. Pasadena, JPL Publication 99-17, p. 299-307, 1999.
- PINTER, P. J.; JACKSON, R. D.; GAUSMAN, H. D. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**, v. 6, n. 12, p. 1813-1825, 1985.

- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS-1 Symposium, 3., 10-14 December, Washington, DC. **Proceedings**. Washington, NASA SP-351, p. 309-317, 1973.
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, n. 3, p. 183-192, 1990.
- TARDIN, A. T.; ASSUNÇÃO, G. V.; SOARES, J. V. Análise preliminar de dados TM para discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas, MG, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n. 9, p. 1355-1361, 1992.
- TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative analysis of hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.66, n. 1, p. 41-51, 1998.
- WIEGAND, C.; ANDERSON, G.; LINGLE, S.; ESCOBAR, D. Soil salinity effects on crop growth and yield: illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. **Journal of Plant Physiology**, v.148, n. 3, p. 418-424, 1996.
- YANG, X. H.; ZHOU, Q. M.; MELVILLE, M. Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, n. 2, p. 453-459, 1997.