

Comportamento espectro-temporal da cana-de-açúcar: uma nova proposta na distribuição espacial dos pontos de controle utilizados na interpolação de superfícies de resposta espectro-temporais

Márcio Pupin de Mello¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff¹
Carlos Antonio Oliveira Vieira²
Daniel Alves de Aguiar¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{pupin, bernardo, daniel}@dsr.inpe.br

²Universidade Federal de Viçosa - UFV
Campus Universitário – 36570-000 - Viçosa - MG, Brasil
carlos.vieira@ufv.br

Abstract. The major attribute of remotely sensed images to observe the land surface is the spectral-temporal characteristic which is paramount for accurate agricultural crop area classification. Agricultural targets present a dynamic spectral-temporal behavior that is very helpful to discriminate among different crops in classification procedures. However, there are only few methods that address this issue in depth. One promising method is the spectral-temporal response surfaces (STRS) approach which uses control points to define response surfaces based on reflectance observed for specific targets of interest at specific spectral bands and at specific dates. In the present work was analyzed the spectral-temporal behavior of sugarcane fields harvested with and without straw burning prior to harvest. The information about sugarcane harvested with and without straw burning is relevant for government control to evaluate the effectiveness of the effort to gradually reduce the harvest practice of sugarcane burning which should cease by 2014 for fields that can be mechanical cultivated. The major objective of this study is to improve the STRS interpolation method. Therefore, two methods for the spatial distribution of the control points were compared. Three sugarcane classes (non-burned cane, burned cane and non-harvested cane) were investigated using 5,000 samples for each class and six Landsat5/TM images acquired from April to September 2007 to interpolate the STRS. Best result was obtained using the method of equidistant values distribution for the wavelength axis. With this new interpolation method it is expected to largely improve the classification of sugarcane fields harvested with different harvest practices.

Palavras-chave: remote sensing, spectral-temporal behavior, multitemporal image classification, control points, sensoriamento remoto, comportamento espectro-temporal, classificação multitemporal de imagens, pontos de controle.

1. Introdução

A cana-de-açúcar exerce um importante papel tanto na economia do Brasil quanto nas questões ambientais internacionais relacionadas com a redução da emissão de gases efeito estufa em virtude do grande potencial que esta cultura apresenta na geração de energia renovável. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2008b) a previsão é que a demanda de etanol no Brasil cresça 150% nos próximos 10 anos, passando a produzir 63,9 bilhões de litros até 2017. Ainda segundo a EPE (2008a) a energia gerada pela cana-de-açúcar por meio do etanol e do bagaço chegou a 16% na composição das fontes primárias de energia utilizadas no país até o mês de maio de 2008, ocupando assim a segunda posição, atrás apenas do petróleo.

Entretanto, apesar de todo o potencial energético, inclusive com a co-geração de energia utilizando a palha da cana-de-açúcar (Santos e Ometto, 2007), seu manejo ainda encontra alguns problemas de ordem socioeconômica e ambiental como, por exemplo, a queima da palha na pré-colheita. Visando extinguir a prática da queima da palha a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) assinaram, em junho de 2007, um protocolo de intenções para extinguir as

queimadas em áreas mecanizáveis até 2014. Nesse contexto o monitoramento das lavouras de cana-de-açúcar com e sem a prática da queima da palha na pré-colheita torna-se importante tanto para avaliar a eficácia do protocolo quanto para fiscalizar o andamento da queima da palha em lavouras autorizadas pela SMA-SP (Aguiar et al., 2008).

Segundo Oetter et al. (2001) o uso de imagens multitemporais de sensoriamento remoto constituem peça fundamental para mapeamento de culturas agrícolas. Elas são obtidas de forma sistemática e repetitiva, em faixas do espectro eletromagnético, que permitem identificar os alvos da superfície terrestre em função da sua resposta espectro-temporal diferenciada. De acordo com Vieira et al. (2000) as culturas agrícolas apresentam significativas alterações na resposta espectral ao longo do ciclo de crescimento, o que embasa o uso de dados multitemporais em aplicações do sensoriamento remoto no monitoramento de culturas agrícolas.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com a SMA-SP, UNICA e o Centro de Tecnologia Canaveira (CTC) vêm monitorando desde 2006, através de imagens de satélites de média resolução espacial (30 m para o Landsat-TM e 20 m para o CBERS2-CCD), a colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (Aguiar et al., 2007). Entretanto, o processo atual de mapeamento é fortemente apoiado na interpretação visual, o que demanda um tempo razoavelmente grande considerando a extensão do cultivo da cana no Estado.

Visto o exposto, o presente trabalho tem por objetivo investigar o comportamento espectro-temporal de lavouras de cana-de-açúcar colhidas com e sem a queima da palha na pré-colheita, estudando a viabilidade e aprimoramento da aplicação de técnicas automatizadas de classificação multitemporal de imagens utilizando superfícies de resposta espectro-temporais para o monitoramento da colheita da cana.

2. Material e Métodos

A área de estudo (Figura 1) localiza-se no Estado de São Paulo, aproximadamente entre os municípios de Ribeirão Preto e São Carlos. É uma região onde predomina o cultivo da cana-de-açúcar possuindo área de 225 km² (500 x 500 *pixels* em uma imagem de resolução espacial de 30 m).

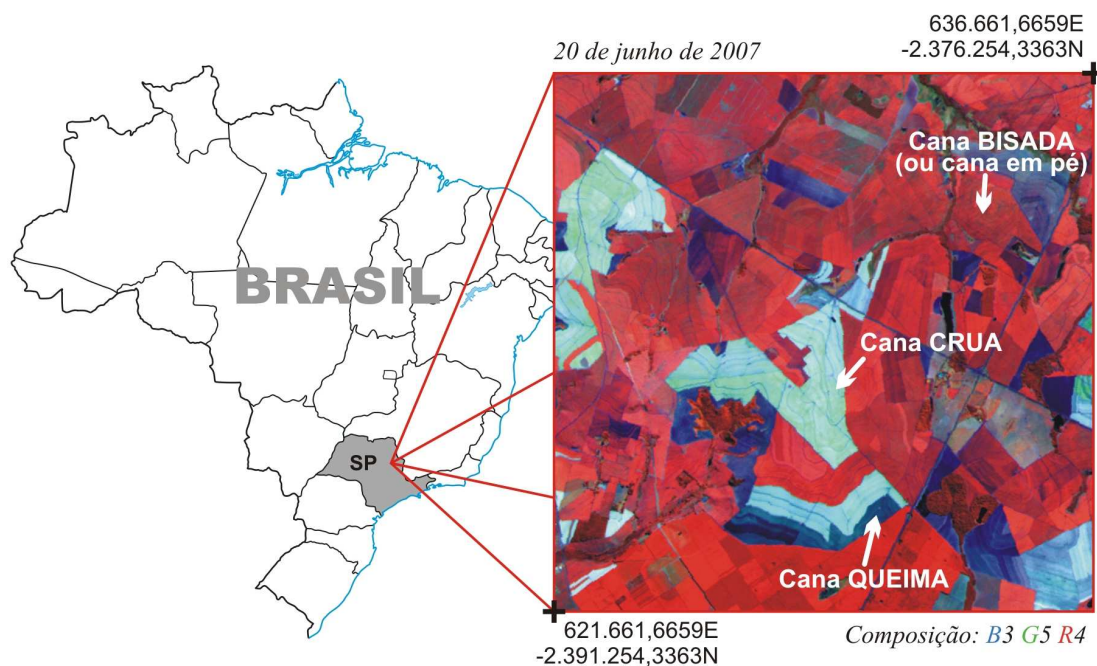


Figura 1. Imagem de 20 de junho de 2007 obtida pelo sensor TM/Landsat5 da área de estudo em composição falsa cor (B3G5R4). As coordenadas seguem o sistema de projeção Policônico, com meridiano de tangência em 54°W, e datum SAD69.

Ao total, foram utilizadas seis imagens do ano de 2007 obtidas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat 5 (bandas 1 a 5 e 7, com resoluções espaciais de 30 m). Elas são datadas de 03 de maio (dia Juliano 123 do ano de 2007), 20 de junho (dia 171), 06 de julho (dia 187), 07 de agosto (dia 219), 23 de agosto (dia 235) e 08 de setembro (dia 251). Essas imagens foram assim escolhidas por corresponderem ao período de colheita da cana (abril a novembro) no Estado de São Paulo e por não apresentarem cobertura de nuvens. Elas foram registradas utilizando polinômios de primeiro e segundo graus e interpolação por vizinho mais próximo, com base em uma imagem previamente georreferenciada no sistema de projeção Policênico e *datum* SAD69. Para todas as imagens obteve-se um erro médio quadrático inferior a 0,5 *pixel*. Em seguida a imagem de 06 de julho foi corrigida radiometricamente para valores de reflectância de superfície utilizando o algoritmo 6S (Vermote et al., 1997) e todas as outras imagens foram normalizadas radiometricamente com base nesta, utilizando o procedimento automático *Iteratively Reweighted Multivariate Alteration Detection* (IR-MAD) (Canty e Nielsen, 2008), fazendo com que todas as imagens da série temporal representem valores de reflectância de superfície.

De posse das imagens pré-processadas procedeu-se o estudo do comportamento espectro-temporal em três classes distintas: *Cana Crua* (CC), que corresponde à cana colhida sem o uso do fogo; *Cana Queima* (CQ), que representa a cana colhida com a queima da palha; e *Cana Bisada* (CB), representando a cana que não foi colhida durante todo o período de tempo analisado. Para a realização desse estudo utilizou-se amostras de 5.000 *pixels* para cada uma das três classes supracitadas, coletadas com base em um mapa de referência obtido por interpretação visual da série temporal de imagens. As amostras coletadas para as duas classes da colheita da cana levaram em conta a colheita “identificada” na segunda data, ou seja, na imagem de 20 de junho de 2007 (dia Juliano 171).

A análise do comportamento espectro-temporal, para cada classe de interesse, foi feito com base nas amostras coletadas estudando-se as médias (assumindo normalidade) das respostas espectrais em cada banda. Estas médias foram utilizadas na interpolação de superfícies de tendência polinomiais levando-se em conta a “assinatura espectral” média da classe no tempo. O procedimento caracteriza-se por utilizar, para cada classe, pontos de controle em três eixos cartesianos, sendo dois independentes (x e y) e um dependente (z). Esses eixos correspondem respectivamente: ao tempo, de acordo com as datas das imagens, dado em dia Juliano; aos comprimentos de onda médios das bandas espectrais do sensor, dado em micrometros; e às médias dos valores de reflectâncias de superfície. Com as seis datas de aquisição das imagens pelo Landsat 5 nas seis bandas do sensor TM (todas exceto a banda 6), tem-se 36 pontos de controle (6 datas x 6 bandas) nesse sistema cartesiano, para cada classe. A partir desses pontos de controle interpola-se a superfície de tendência de grau d (que no caso desse estudo foi igual a cinco) usando regressão polinomial múltipla (método conhecido como PTS: *Polynomial Trend Surface*) em algoritmo modelado por Mello e Vieira (2006), segundo o modelo expresso na Equação 1.

$$\hat{z} = f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + \dots + a_{\frac{(d+1)(d+2)-2}{2}}y^d \quad (1)$$

Em que, os termos a_i são os coeficientes ajustados da superfície. Existem outros métodos analíticos de interpolação de superfícies como, por exemplo, o *Collocation* (Watson, 1992), no qual a superfície ajustada tem a característica de tangenciar todos os pontos de controle. Entretanto, além de ser computacionalmente mais caro que o PTS, essa característica do *Collocation* pode ser prejudicial no caso de ruídos nas imagens, como a presença de nuvens ou saturação de algum detector do sensor no momento do imageamento (Vieira et al., 2000).

A Figura 2 mostra um diagrama geral da metodologia empregada na investigação do comportamento espectro-temporal das três classes investigadas.

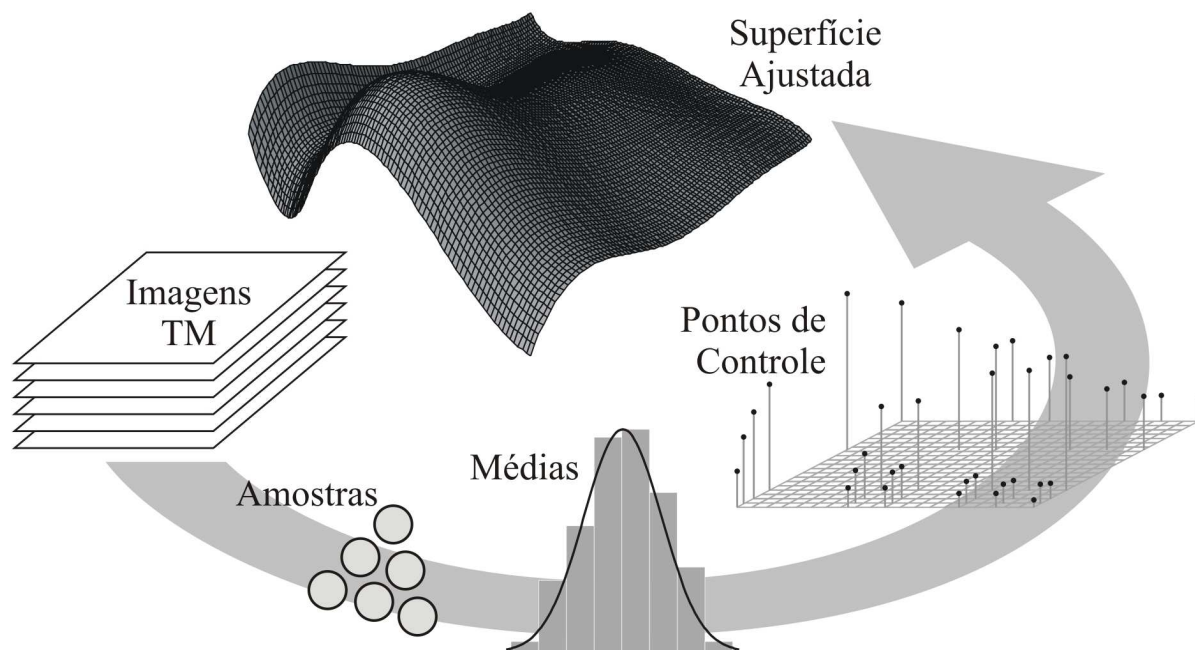


Figura 2. Esquema ilustrativo da metodologia empregada no estudo do comportamento espectro-temporal das classes investigadas.

Devido ao grande intervalo que os valores dos pontos de controle podem assumir nos eixos cartesianos eles devem ser re-escalados no intervalo fechado entre 0 e 1, conforme recomenda Vieira (2000) e está expresso na Equação 2.

$$X' = \frac{(X - \min)}{(\max - \min)} \quad (2)$$

Em que: X' é o novo valor re-escalado para o intervalo $[0,1]$; X é o valor a ser re-escalado; e \min e \max representam o menor e o maior valor, respectivamente, dos dados referentes à normalização de X' .

No presente estudo uma nova metodologia de distribuição espacial dos pontos de controle foi elaborada para gerar valores no eixo do comprimento de onda (eixo y) com distribuição equidistante no intervalo fechado entre zero e um. Para tal é utilizada uma Progressão Aritmética (PA) em que a razão (r) é calculada de acordo com o número de bandas consideradas, como mostra a Equação 3.

$$r = \frac{(\lim_{sup} - \lim_{inf})}{(n_{bandas} - 1)} \quad (3)$$

Em que: r é a razão da PA; \lim_{sup} e \lim_{inf} são os limites superior e inferior do intervalo, respectivamente, igual a 1 e 0; e n_{bandas} é o número de bandas espectrais utilizadas. Assim, para o caso de seis bandas e intervalo $[0,1]$, a razão seria 0,2 e teríamos os seis valores distribuídos nos níveis: 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; e 1,0.

3. Resultados e Discussão

De posse das amostras das classes de *Cana Crua*, *Cana Queima* e *Cana Bisada* foi gerada uma tabela (Tabela 1) e um gráfico (Figura 3) com as médias de valores de reflectâncias de superfície em cada banda, para cada data, visando à análise comparativa do comportamento espectro-temporal entre estas classes.

Tabela 1. Valores médios de reflectância de superfície das classes *Cana Crua*, *Cana Queima* e *Cana Bisada*, para cada data nas diferentes bandas do sensor TM, em que o grifo corresponde à data da imagem na qual a colheita foi identificada.

Cana Crua (CC)						
Data da Imagem (dia juliano)	Banda					
	1 ^a	2 ^b	3 ^c	4 ^d	5 ^e	7 ^f
03/05/2007 (123)	.026	.061	.050	.267	.141	.063
20/06/2007 (171)	.058	.103	.147	.216	.338	.245
06/07/2007 (187)	.053	.091	.125	.215	.320	.229
07/08/2007 (219)	.045	.080	.110	.216	.294	.212
23/08/2007 (235)	.041	.074	.095	.222	.273	.192
08/09/2007 (251)	.034	.065	.077	.226	.243	.164

Cana Queima (CQ)						
Data da Imagem (dia Juliano)	Banda					
	1 ^a	2 ^b	3 ^c	4 ^d	5 ^e	7 ^f
03/05/2007 (123)	.025	.055	.048	.243	.136	.063
20/06/2007 (171)	.019	.043	.071	.100	.113	.106
06/07/2007 (187)	.018	.042	.068	.098	.104	.099
07/08/2007 (219)	.019	.043	.069	.109	.109	.100
23/08/2007 (235)	.019	.043	.066	.117	.109	.095
08/09/2007 (251)	.018	.041	.055	.131	.106	.084

Cana Bisada (CB)						
Data da Imagem (dia juliano)	Banda					
	1 ^a	2 ^b	3 ^c	4 ^d	5 ^e	7 ^f
03/05/2007 (123)	.023	.052	.047	.218	.135	.065
20/06/2007 (171)	.023	.052	.045	.237	.133	.059
06/07/2007 (187)	.024	.052	.046	.235	.132	.061
07/08/2007 (219)	.024	.053	.048	.234	.135	.061
23/08/2007 (235)	.024	.053	.048	.240	.131	.059
08/09/2007 (251)	.023	.051	.047	.246	.128	.057

^a azul; ^b verde; ^c vermelho; ^d infravermelho próximo; ^e e ^f infravermelho médio.

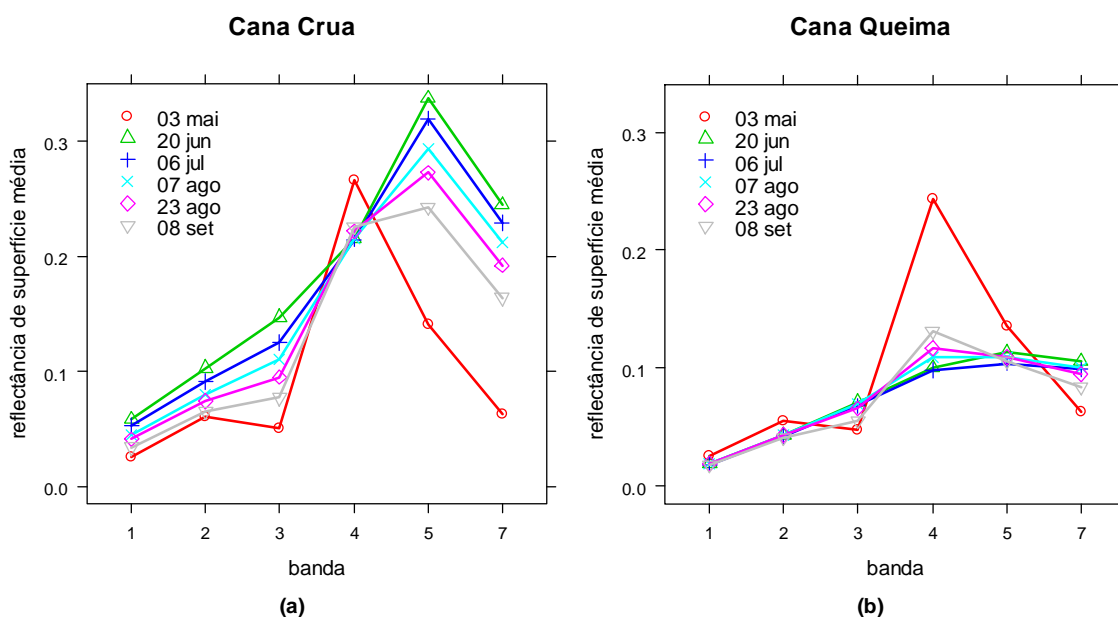


Figura 3. Gráfico exibindo o comportamento espectro-temporal das classes (a) *Cana Crua* e (b) *Cana Queima*.

Analisando os valores da Tabela 1 podemos notar que, para as duas classes de colheita da cana, é possível perceber uma alteração brusca no valor médio da reflectância quando ocorre a colheita, o que não acontece na classe *CB*, que mantém sua resposta espectral praticamente constante ao longo do tempo. Em geral, para a classe *CC* os valores de reflectância aumentaram consideravelmente em todas as bandas, exceto na banda 4, que corresponde à região do infravermelho próximo, com comprimento de onda entre 0,776 e 0,905 μm . Isso faz sentido, pois a palha seca da cana e o solo refletem mais em todos os comprimentos de onda das bandas do TM, exceto na banda 4 em que a vegetação tem reflectância mais alta. Já para a classe *CQ* os valores de reflectância tenderam a diminuir, exceto nas bandas 3 e 7, que correspondem às faixas espectrais do vermelho (0,624 a 0,693 μm) e infravermelho médio (2,097 a 2,347 μm), respectivamente. Esse comportamento se deve ao fato do solo ter reflectância muito menor com a ausência da palha e presença da fuligem. A Figura 3 apresenta visualmente o comportamento espectro-temporal das classes de colheita da cana.

Durante a etapa de interpolação das superfícies percebeu-se que o comportamento da superfície ajustada para a *Cana Crua* não gerava uma superfície que descrevesse corretamente a tendência dos pontos de controle, como pode ser visto na Figura 4a. É provável que este ajuste ruim da superfície se deva à má distribuição espacial dos pontos de controle em relação ao eixo de comprimento de onda, onde as bandas do visível e do infravermelho próximo se encontram muito concentradas. Assim, testou-se um método alternativo de distribuição dos pontos de controle, de maneira que, ao invés de re-escalonar os valores do eixo de comprimento de onda, esses valores fossem gerados de modo que os seis níveis (representando as seis bandas do TM) ficassem localizados equidistantemente no intervalo fechado entre 0 e 1 (zero e um). A superfície ajustada utilizando esse novo método de organizar o eixo de comprimento de ondas é mostrada na Figura 4b.

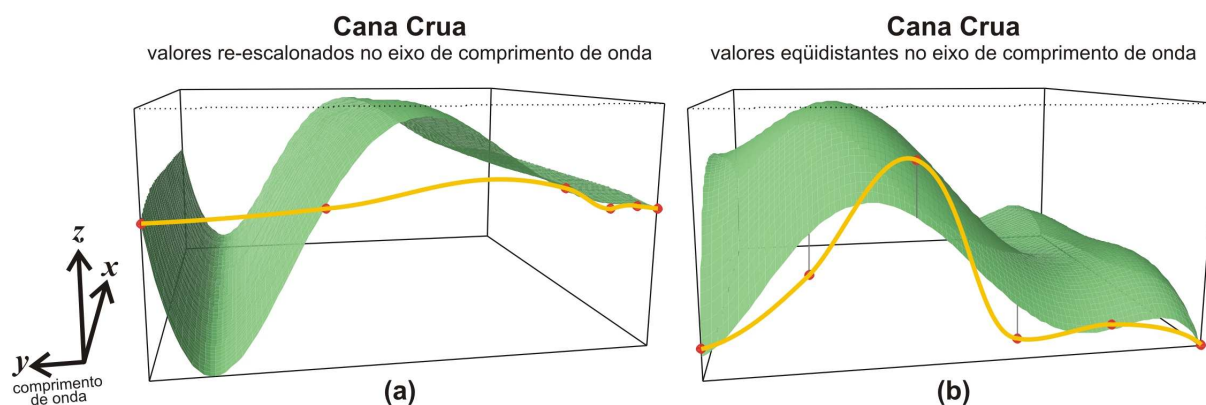


Figura 4. Superfícies ajustadas para a classe *Cana Crua*: (a) utilizando o método tradicional, em que os valores dos comprimentos de onda são re-escalados proporcionalmente entre zero e um; e (b) utilizando o método proposto, em que os valores de comprimento de ondas são dispostos equidistantemente entre zero e um.

Observando a Figura 4 notamos que a linha de tendência dos pontos da superfície ajustada pelo método convencional (Figura 4a), apesar de praticamente tangenciar os pontos de controle, exagera demasiadamente em curvaturas onde a densidade de pontos é menor, que corresponde aos maiores comprimentos de onda (bandas 5 e 7 do TM). Já a superfície que utiliza a nova metodologia proposta, em que os valores do eixo de comprimento de onda são equidistantes (Figura 4b), descreve mais fielmente a tendência mostrada pelos pontos de controle, apesar de não tangenciar todos os pontos. Entretanto, o fato de não tangenciar os pontos era esperado, pois, como próprio nome (*Polynomial Trend Surface*) diz, o método interpola uma superfície que descreve a tendência dos pontos de controle.

A Figura 5 mostra as três superfícies interpoladas pela metodologia convencional, com o eixo de comprimento de onda re-escalado proporcionalmente entre zero e um.

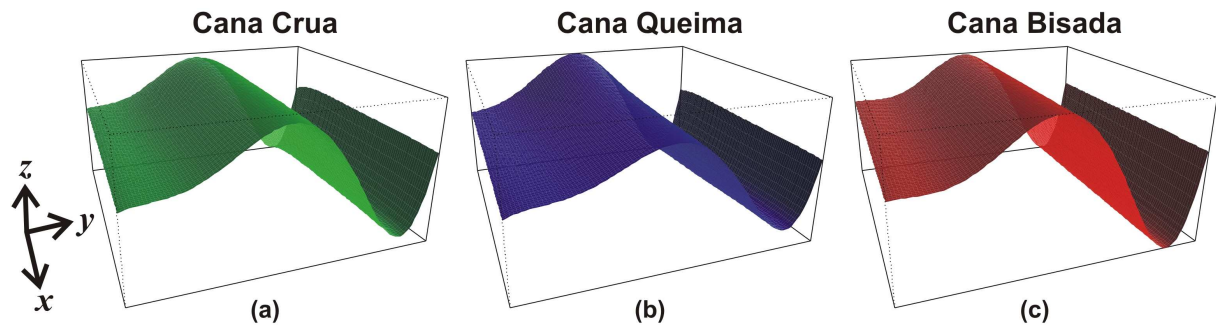


Figura 5. Superfícies ajustadas, utilizando a distribuição tradicional proporcionalmente re-escalada para o eixo de comprimento de onda, das três classes: (a) *Cana Crua*; (b) *Cana Queima*; e (c) *Cana Bisada*.

Visualmente, as três superfícies ajustadas pelo método tradicional (Figura 5) têm formas muito semelhantes. Também é possível perceber que nas classes *CQ* e *CB* as superfícies (Figuras 5b e 5c, respectivamente) apresentaram o mesmo problema citado para o ajuste referente à classe *CC*, quanto ao exagero demasiado nas curvaturas, especialmente na concavidade existente entre as bandas 5 e 7.

Assim, foram novamente interpoladas as superfícies das três classes, valendo-se da metodologia proposta neste trabalho para interpolação das superfícies (Figura 6).

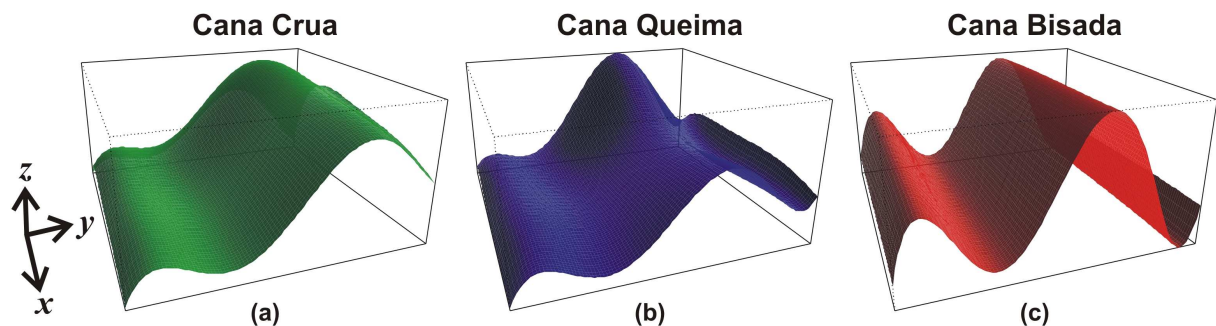


Figura 6. Superfícies ajustadas para as três classes: (a) *Cana Crua*; (b) *Cana Queima*; e (c) *Cana Bisada*, utilizando o método proposto em que os valores de comprimento de ondas são dispostos equidistantemente entre zero e um.

Foi possível perceber que para a classe *CB* (Figura 6c) a superfície ajustada também apresentou o problema da criação de uma concavidade exagerada entre as bandas 5 e 7. Entretanto, é bastante evidente que a metodologia proposta apresenta um bom potencial para classificar com precisão as classes de colheita da cana-de-açúcar utilizando o procedimento de classificação por superfícies de resposta espectro-temporal.

4. Conclusões

Os resultados da investigação do comportamento espectro-temporal da cana-de-açúcar mostraram que existe um padrão associado a cada classe investigada. O método proposto com os valores do eixo do comprimento de onda equidistantes melhora a distribuição espacial dos pontos de controle permitindo melhor ajuste das superfícies de resposta espectro-temporal.

Recomenda-se, em trabalhos futuros, que se realizem estudos comparativos aplicados entre as classificações utilizando a metodologia tradicional e a nova metodologia aqui proposta de distribuição espacial dos pontos de controle.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Morton J. Canty, do *Jülich Research Center*, em Jülich, Alemanha, pela ajuda com a normalização radiométrica IR-MAD.

Referências Bibliográficas

- Aguiar, D. A.; Adami, M.; Rudorff, B. F. T.; Sánchez, G. A.; Barros, M. A.; Sugawara, L. M.; Shimabukuro, Y. E.; Moreira, M. A. **Mapeamento da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo - ano safra 2006/2007**. São José dos Campos-SP: INPE, 2007. 48 p. (INPE-14788-RPE/811).
- Aguiar, D. A.; Rudorff, B. F. T.; Silva, W. F. Monitoramento do modo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo - Brasil por meio de imagens de sensores orbitais em dois anos-safra. In: Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER), 13., 2008, Havana, Cuba. **Anais...** Havana: SELPER, 2008.
- Canty, M. J.; Nielsen, A. A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 1025-1036, 2008.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Informe à Imprensa - Resultados preliminares BEN 2008**: Cana-de-açúcar já é a segunda fonte primária de energia no Brasil. 2008a. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PressReleases/20080508_1.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- _____. **Informe à Imprensa – PDE 2008-2017 - Etanol**: demanda de etanol no país crescerá 150% nos próximos dez anos. 2008b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PressReleases/20080924_1.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2008.
- Mello, M. P.; Vieira, C. A. O. Modelagem de um interpolador “Polynomial Trend Surface” usando o software livre R para gerar superfícies de assinaturas espectrais multitemporais de culturas agrícolas. In: Simpósio de Iniciação Científica da Universidade Federal de Viçosa, 15., 2006, Viçosa, MG. **Resumos...** Viçosa: UFV, 2006. n. 897. CD-ROM. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br:80/rep-/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/04.29.02.11>>. Acesso em: 29 abr. 2008.
- Oetter, D. R.; Cohen, W. B.; Berterretche, M.; Maiersperger, T. K.; Kennedy, R. E. Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 139-155, 2001.
- Santos, L. O. M.; Ometto, A. R. Ganhos potenciais de cogeração e de créditos de carbono através da palha da cana: uma perspectiva para a indústria sucroalcooleira. In: Conferência Internacional sobre Engenharia para Energia Sustentável em Países em Desenvolvimento (CIE2007), 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: WFEO, 2007. Disponível em: <www.cie2007.com.br/trabalhos/luizoctaviomalufsantos.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2008.
- Vermote, E. F.; Tanre, D.; Deuze, J. L.; Herman, M. A.; Morcette, J. J. A. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.
- Vieira, C. A. O. **Accuracy of remotely sensing classification of agricultural crops**: a comparative study. 2000. 323 p. Tese (Ph.D. em Geografia Física) - University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra, 2000.
- Vieira, C. A. O.; Mather, P. M.; McCullagh, M. The Spectral-Temporal Response Surface and its use in the multi-sensor, multitemporal classification of agricultural crops. In: Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 33., 2000, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam, Holanda: International Archive Photogrammetry and Remote Sensing, 2000. p. 16-23.
- Watson, D. F. **Contouring**: a guide to the analysis and display of spatial data. 1 ed. Oxford, England: Pergamon Press, v. 10, 1992. 321 p.