

## Seleção de amostras espectrais candidatas a membro de referência em imagens hiperespectrais

Marco Antonio Pizarro<sup>1,2</sup>  
David Fernandes<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
pizarro@dea.inpe.br

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/CTA  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - 12228-900 - São José dos Campos - SP, Brasil  
pizarro@ita.br, david@ita.br

**Abstract.** This paper describes the selection process of spectral samples suitable to be endmembers in hyperspectral images. The selection is based in the samples neighborhood similarity carried out by a spatial selection, by a homogeneity statistical test and by a redundancy test among samples, based on the spectral coherence and distance. The method performance is tested with an AVIRIS image.

**Palavras-chave:** hyperspectral images, endmembers selection, imagens hiperespectrais, seleção de membros de referência.

### 1. Introdução

Um dos modos de classificar as classes de alvos presentes em imagens hiperespectrais é a determinação dos espectros de elementos puros ou os menos contaminados na cena (membros de referência ou *endmembers*). O conjunto desses Membros de Referência (MR) deve ser escolhido de modo a ser capaz de explicar e abranger a variabilidade espectral inerente da cena (Keshava e Mustard, 2002). A seleção adequada dos tipos dos MR, bem como o seu número, permitem melhor acurácia na estimação das imagens-fração abundâncias no modelo de mistura (Roberts et al., 1998). Para que os MR escolhidos possam representar bem a diversidade de classes de alvos eles devem ser escolhidos segundo critérios que levem em consideração a natureza espacial e espectral dos dados hiperespectrais.

Neste trabalho, propõe-se uma metodologia que em função de propriedades consideradas necessárias, não suficientes, estabelece-se um critério para se poder considerar uma amostra espectral como um possível MR. Considera-se como premissa que o espectro candidato a MR é formado pela média dos espectros em uma vizinhança de uma amostra da cena e que as propriedades para que esse espectro médio possa ser um candidato a MR são: a) pertinência a uma vizinhança. Serão considerados *pixels* pertinentes à uma vizinhança somente aqueles que apresentarem certa similaridade entre si e que forem maioria na dada vizinhança inicial de dimensões  $(M+1) \times (M+1)$ , com  $M$  par. Deste modo o espectro médio é calculado somente em função dos *pixels* relacionados à vizinhança pertinente. Caso essa vizinhança não exista o espectro é descartado; b) os espectros médios devem ser calculados em uma vizinhança com espectros homogêneos, caso a vizinhança seja considerada estatisticamente não homogênea o espectro médio é descartado e c) os espectros médios candidatos a MR não devem ser redundantes, se o espectro for considerado redundante com outro ele também é descartado do conjunto dos candidatos a serem MR.

A condição de pertinência de um *pixel* (espectro) à vizinhança é realizada neste trabalho pela Seleção Espacial de *pixels* e as condições de Homogeneidade e de Redundância são verificadas, respectivamente, pelos Testes de Homogeneidade e Redundância.

## 2. Seleção Espacial

Consideremos a amostra  $k$ , candidata a MR, com  $1 \leq k \leq K$ , identificada pelo pixel  $(i_k, j_k)$ , e a sua vizinhança  $(M+1) \times (M+1)$ , com  $M$  par, em torno do pixel  $(i_k, j_k)$ . Os  $(M+1)^2$  espectros dessa vizinhança são representados por  $\vec{I}(p, q) = [I(p, q, 1), I(p, q, 2), \dots, I(p, q, N)]^T$  onde  $i_k - M/2 \leq p \leq i_k + M/2, j_k - M/2 \leq q \leq j_k + M/2$ .

A detecção dos espectros que contaminam a vizinhança da amostra  $(i_k, j_k)$ , devido a uma possível mistura de classes, é feita em duas etapas. Na primeira etapa, calcula-se a média espectral de todos os espectros da vizinhança  $(M+1) \times (M+1)$  obtendo-se o conjunto:

$$M(i_k, j_k) = \{m(p, q), i_k - M/2 \leq p \leq i_k + M/2, j_k - M/2 \leq q \leq j_k + M/2\} \quad (1)$$

O conjunto  $M(i_k, j_k)$  com os seus elementos ordenados em ordem crescente será representado por:  $M_{ord}(i_k, j_k) = \{M(i_k, j_k, (n)), n = 1, 2, \dots, (M+1)^2\}$ .

Escolhe-se então como espectro de referência o espectro  $\vec{I}(p, q)$  cujo valor espectral médio  $m(p, q)$  corresponde a mediana de  $M_{ord}(i_k, j_k)$ , ou seja,  $m(p, q) = M(i_k, j_k, (\lfloor M^2/2 \rfloor))$ , onde  $\lfloor \cdot \rfloor$  representa o menor valor inteiro. Portanto, o espectro de referência da vizinhança do *pixel*  $(i_k, j_k)$  é dado por:

$$\vec{I}_k = I(p, q) \text{ tal que } m(p, q) = M(i_k, j_k, (\lfloor (M+1)^2/2 \rfloor)) \quad (2)$$

Em uma segunda etapa calcula-se a Coerência Espectral (CE) entre o espectro de referência  $\vec{I}_k$  e todos os espectros da vizinhança  $(M+1) \times (M+1)$  pela expressão:

$$CE(\vec{I}_k, \vec{I}(p, q)) = \frac{\langle \vec{I}_k - \|\vec{I}_k\|, \vec{I}(p, q) - \|\vec{I}(p, q)\| \rangle}{\|\vec{I}_k - \|\vec{I}_k\|\| \cdot \|\vec{I}(p, q) - \|\vec{I}(p, q)\|\|} \quad (3)$$

A seguir rejeita-se os espectros  $\vec{I}(p, q)$  cuja coerência espectral com o espectro de referência for inferior a um certo limiar  $\psi_e$ , que será chamado de limiar igualdade ou limiar da seleção espacial. Portanto, a nova vizinhança do *pixel*  $(i_k, j_k)$  será formada pelo conjunto de *pixels*:

$$V(i_k, j_k) = \left\{ \vec{I}(p, q), \text{ tal que } CE(\vec{I}_k, \vec{I}(p, q)) \leq \psi_e, \right. \\ \left. \text{com } i_k - M/2 \leq p \leq i_k + M/2, j_k - M/2 \leq q \leq j_k + M/2 \right\} \quad (4)$$

Adota-se como critério para a amostra espectral analisada  $k$  continuar sendo candidata a MR se 60% (porcentagem de pureza) dos *pixels* na vizinhança considerada satisfizer a desigualdade  $CE(\vec{I}_k, \vec{I}(p, q)) \leq \psi_e$ , ou seja,  $\#V(i_k, j_k) \geq 0,6 \times (M+1)^2$ , onde  $\#V(i_k, j_k)$  representa a cardinalidade do conjunto  $V(i_k, j_k)$ .

O limiar do filtro espacial,  $\psi_e$ , foi estabelecido utilizando-se uma amostra que continha água ( $a$ ) contaminada com vegetação verde ( $vvI$ ). O limiar adotado,  $\psi_e = 0,78$ , permitiu que as amostras de água continuassem sendo candidatas a MR, satisfazendo a igualdade  $\#V(i_k, j_k) = 0,6 \times (M+1)^2$ , para  $M+1 = 5$ . A escolha do espectro de referência como sendo aquele

cuja média espectral corresponde a mediana de  $M_{ord}(i_k, j_k)$  possibilita a rejeição dos espectros muito contrastantes da maioria dos espectros presentes na vizinhança  $(M+1) \times (M+1)$  da amostra candidata. O critério de exigir que pelo menos 60% das amostras originais na vizinhança  $(M+1) \times (M+1)$  estejam presentes no novo conjunto de amostras também pode ser alterado desde que se esse valor seja superior a 50%, visto que o espectro de referência foi escolhido em função da mediana dos espectros médios.

### 3. Teste da Homogeneidade

No teste de homogeneidade tem como objetivo avaliar a similaridade entre os espectros dos *pixels* dentro da vizinhança definida por  $V(i_k, j_k)$ . Assim quanto mais similares são os espectros, na vizinhança, mais homogenia será a amostra e em consequência pode-se afirmar que os espectros tendem a pertencer à mesma classe e/ou subclasse de alvo.

Para o teste da homogeneidade dividi-se o conjunto de amostras da vizinhança de  $(i_k, j_k)$  em dois grupos de amostras escolhidas aleatoriamente. Sejam estes grupos de amostras representados por  $V_0(i_k, j_k)$  e  $V_1(i_k, j_k)$  de modo que  $V_0(i_k, j_k) \cap V_1(i_k, j_k) = \emptyset$ .

$$\#V_0(i_k, j_k) + \#V_1(i_k, j_k) = \begin{cases} (M+1)^2, & \text{sem seleção espacial} \\ \#V(i_k, j_k), & \text{com seleção espacial} \end{cases} \quad (5)$$

Para cada conjunto de amostras espectrais em  $V_0(i_k, j_k)$  e  $V_1(i_k, j_k)$  calcula-se o vetor espectro médio e o vetor variância espectral, dados respectivamente por

$$\bar{I}_{mr}(i_k, j_k) = \frac{1}{\#V_r(i_k, j_k)} \sum_{\bar{I}(p,q) \in V_r(i_k, j_k)} \bar{I}(p, q), \quad r = 0, 1 \quad (6)$$

e

$$\bar{V}_r(i_k, j_k) = \frac{1}{\#V_r(i_k, j_k) - 1} \sum_{\bar{I}(p,q) \in V_r(i_k, j_k)} [\bar{I}(p, q) - \bar{I}_{mr}(i_k, j_k)]^2, \quad r = 0, 1. \quad (7)$$

Faz-se para cada banda espectral um teste estatístico para se verificar a igualdade das médias. Para cada banda espectral  $n$ . O teste é definido por:

$$t(i_k, j_k, n) = \frac{I_{m0}(i_k, j_k, n) - I_{m1}(i_k, j_k, n)}{\sqrt{\left( \frac{V_0(i_k, j_k, n)}{\#V_0(i_k, j_k)} + \frac{V_1(i_k, j_k, n)}{\#V_1(i_k, j_k)} \right)}} \quad (8)$$

onde os valores  $I_{m0}(i_k, j_k, n)$ ,  $I_{m1}(i_k, j_k, n)$ ,  $V_0(i_k, j_k, n)$  e  $V_1(i_k, j_k, n)$  são respectivamente as  $n$ -ésimas componentes dos vetores  $\bar{I}_{m0}(i_k, j_k)$ ,  $\bar{I}_{m1}(i_k, j_k)$ ,  $\bar{V}_0(i_k, j_k)$  e  $\bar{V}_1(i_k, j_k)$ .

Considerando que a estatística  $t(i_k, j_k, n)$  tem uma distribuição t-Student (Shanmugan e Breipohl, 1988, p. 494 e 520) com  $g = \#V_0(i_k, j_k) + \#V_1(i_k, j_k) - 2$  graus de liberdade, aceita-se a igualdade das médias com um grau de significância  $\alpha$  se  $|t(i_k, j_k, n)| \leq t_{g; \alpha/2}$ .

A aleatoriedade na escolha das amostras de ambos os grupos assegura maior independência entre os mesmos, facilitando a aplicação do teste estatístico em  $t(i_k, j_k, n)$ .

Seja o indicador de igualdade das médias definido por:

$$I_h(i_k, j_k, n) = \begin{cases} 1, & \text{se } |t(i_k, j_k, n)| \leq t_{g; \alpha/2} \\ 0, & \text{se } |t(i_k, j_k, n)| > t_{g; \alpha/2} \end{cases} \quad (9)$$

e o indicador de homogeneidade definido por:

$$Q_h(i_k, j_k) = \frac{1}{\#V_0(i_k, j_k) + \#V_1(i_k, j_k)} \sum_{n=1}^N I_h(i_k, j_k, n) \quad (10)$$

Considera-se que o conjunto de amostras na vizinhança do *pixel*  $(i_k, j_k)$  é homogêneo se:

$Q_h(i_k, j_k) \geq \psi_h$ , onde  $0.5 < \psi_h \leq 1$  é o padrão de homogeneidade. Por exemplo, se o padrão de homogeneidade for  $\psi_h = 0,90$ , 90% dos espectros médios devidos às duas partições  $V_0(i_k, j_k)$  e  $V_1(i_k, j_k)$  devem ser considerados iguais para que a vizinhança do *pixel*  $(i_k, j_k)$  seja considerada homogênea.

#### 4. Teste da Redundância

A redundância é baseada no cálculo das métricas (Distância Euclidiana)  $DE$  e  $CE$  entre os espectros médios  $\bar{I}_{mk}$ ,  $1 \leq k \leq K$ , de todas as amostras candidatas e um espectro de referência  $\bar{I}_{ref}$ . O espectro médio da amostra  $k$  é dado por:

$$\bar{I}_m(i_k, j_k) = \bar{I}_{mk} = \frac{1}{\#V(i_k, j_k)} \sum_{\bar{I}(p,q) \in V(i_k, j_k)} \bar{I}(p, q), \quad (11)$$

sendo escolhido como espectro de referência o espectro médio referente a todos os espectros candidatos a MR.

A  $DE$  e a  $CE$  são então calculadas, para  $1 \leq k \leq K$ , respectivamente por:

$$DE_k = \|\bar{I}_{mk} - \bar{I}_{ref}\| = \sqrt{\langle \bar{I}_{mk}, \bar{I}_{ref} \rangle} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_{mk}(n) - I_{ref}(n))^2} \quad (12)$$

e

$$CE_k = \frac{\langle \bar{I}_{mk} - \|\bar{I}_{mk}\|, \bar{I}_{ref} - \|\bar{I}_{ref}\| \rangle}{\|\bar{I}_{mk} - \|\bar{I}_{mk}\|\| \cdot \|\bar{I}_{ref} - \|\bar{I}_{ref}\|\|} \quad (13)$$

onde  $DE_k \geq 0$ ,  $DE(\bar{I}_{ref}, \bar{I}_{ref}) = 0$ ,  $0 \leq CE_k \leq 1$  e  $CE(\bar{I}_{ref}, \bar{I}_{ref}) = 1$ . Ordenando-se as medidas  $DE_k$ ,  $1 \leq k \leq K$ , em ordem crescente tem-se:  $DE_{(1)}, DE_{(2)}, \dots, DE_{(K)}$  e as medidas  $CE_k$ ,  $1 \leq k \leq K$ , em ordem decrescente tem-se:  $CE_{[1]}, CE_{[2]}, \dots, CE_{[K]}$ .

Para se estimar a proximidade das amostras entre si, baseado no cálculo das métricas  $DE$  e  $CE$  em relação a um espectro de referência, calcula-se, respectivamente, a diferença relativa entre as medidas consecutivas  $DE$  e  $CE$  das amostras:

$$\Delta DE_{(k-1)} = \frac{DE_{(k)} - DE_{(k-1)}}{DE_{(k)}} \text{ para } k = K, K-1, \dots, 2 \quad (14)$$

$$\Delta CE_{[k]} = \frac{CE_{[k-1]} - CE_{[k]}}{CE_{[k-1]}} \text{ para } k = 2, 3, \dots, K \quad (15)$$

Define-se o padrão de redundância  $0 \leq \psi_{rde} \leq 1$  e  $0 \leq \psi_{rce} \leq 1$  de modo que são consideradas as amostras menos redundantes aquelas que satisfazem os seguinte critérios:  $\Delta DE_{(k-1)} \geq \psi_{rde}$  e  $\Delta CE_{[k]} \leq \psi_{rce}$  com  $2 \leq k \leq K$ .

O conjunto de amostras menos redundantes é dado por:

$$\mathfrak{R} = \left\{ p \mid p = (K) \wedge [p = (q) \text{ se } \Delta DE_{(q)} \geq \psi_{rde}, \text{ com } q = K-1, K-2, \dots, 2, 1] \right. \\ \left. \cap \left\{ p \mid p = (1) \wedge [p = [q] \text{ se } \Delta DC_{[q]} \geq \psi_{rce}, \text{ com } q = 2, 3, \dots, K] \right\} \right\} \quad (16)$$

Pode-se ainda utilizar-se a união dos critérios da *DE* e *CE* na determinação da redundância, bem como um desses critérios isoladamente.

## 5 – Resultados

A área de estudo para o teste da seleção proposta situa-se próximo à cidade de Campo Grande, MS, e nas coordenadas 19°55'S e 53°30'W. A área é dominada pela presença de Inceptisols (areia quartzosa), Oxisols (latossolo vermelho-escuro) e Ultisols (terra roxa estruturada), que representa uma transição química de baixo para altos teores de ferro, óxidos de titânio e fração argila (Novaes et al., 1983 e Pizarro, 1999).

Os dados AVIRIS utilizados foram adquiridos em 20 de agosto de 1995, praticamente no ápice da estação regional seca, em 224 faixas estreitas (~10 nm de largura), posicionadas na faixa espectral óptica de  $383 \leq \lambda \leq 2.509$ ,  $\lambda$  em nm, e com resolução espacial nominal de 20 x 20 m. A subcena selecionada (subcena 7) é formada por uma área retangular de 12 por 10 km (614 x 512 *pixels*), aproximadamente. Os dados, originalmente fornecidos em valores de radiância, foram convertidos para valores de reflectância de superfície pelo método de transferência radiativa baseado no MODTRAN (Green, 1991).

O conjunto de imagens, com os valores de reflectância, é representado por  $I_o(i, j, \lambda)$ , onde  $(i, j)$  denota a localização do *pixel* e  $\lambda$  o comprimento de onda da banda espectral. Do conjunto de imagens excluem-se as bandas de 1 a 8 ( $\approx 383 \leq \lambda \leq 451$ ) por ausência de dados e 218 a 224 ( $\approx 2.450 \leq \lambda \leq 2.509$ ) por estarem extremamente ruidosas. Nas bandas 78 a 85 ( $\approx 1.095 \leq \lambda \leq 1.162$ ), 95 a 123 ( $\approx 1.258 \leq \lambda \leq 1.512$ ) e 145 a 175 ( $\approx 1.731 \leq \lambda \leq 2.021$ ) o MODTRAN introduziu correções excessivas, transformando as bandas de absorção causadas pelas respectivas influências do vapor d'água e do CO<sub>2</sub> em picos de reflectância. Os valores destas bandas foram suprimidos e novos valores foram estimados utilizando-se a função *spline* cúbica. O novo conjunto de imagens foi representado por  $I(i, j, n)$ , onde  $n$  ( $1 \leq n \leq N$ ) denota o número da banda, ou cada uma das imagens. Deste modo os valores correspondentes ao comprimento de onda foram substituídos pelos respectivos valores do número da banda. No processo de interpolação considerou-se que os valores discretos dos espectros estão igualmente espaçados e correspondem todos a uma mesma largura de banda. Para o conjunto de imagens hiperespectrais avaliadas  $N = 209$ .

Para os testes previstos neste trabalho escolheu-se 32 amostras espectrais dispostas do seguinte modo: vegetação verde tipo 1 (*vv1(a)*, *vv1(b)*, *vv1(c)* e *vv1(d)*); vegetação verde tipo 2 (*vv2(a)*, *vv2(b)*, *vv2(c)*, e *vv2(d)*); vegetação verde tipo 3 (*vv3(a)*, *vv3(b)*, *vv3(c)*, e *vv3(d)*); vegetação seca (*vs(a)*, *vs(b)*, *vs(c)*, e *vs(d)*); areia quartzosa (*saq(a)*, *saq(b)*, *saq(c)*, e *saq(d)*); latossolo vermelho escuro (*sle(a)*, *sle(b)*, *sle(c)*, e *sle(d)*); terra roxa estruturada (*ste(a)*, *ste(b)*, *ste(c)*, *ste(d)* e *ste(e)*) e água (*a(a)*, *a(b)* e *a(c)*). Além dessas amostras, escolhidas por um especialista, fez-se uma amostragem aleatória na cena de modo a ter-se mais 576 amostras escolhidas aleatoriamente e homogeneamente na área da cena. Neste caso cada amostra foi considerada uma classe e/ou subclasse distinta.

A **Figura 1a** ilustra pequeno trecho, 20 x 18 *pixels*, da imagem subcena 7 onde está demarcada a vizinhança com 5 x 5 *pixels* centralizada na amostra espectral *a(c)* pertencente a um corpo d'água e na **Figura 1b** estão apresentados os 25 espectros da vizinhança 5x5 em torno de *a(c)*. Observa-se que os 19 espectros selecionados, 76% de 25 possíveis, (**Figura 2a**) pelo processo de seleção espacial possuem menores variações e por isso tendem a serem mais

próximos uns aos outros, indicativo de espectros menos contaminados. O *pixel* indicado pelo número 7 tem o seu espectro médio utilizado como referência no cálculo da correlação entre os espectros. Os espectros rejeitados são mostrados na **Figura 2b**. Provavelmente os *pixels* numerados por 18 e de 21 a 25 (em vermelho na **Figura 2a**) estão contaminados por vegetação situada à margem do corpo d'água. A contaminação é mais acentuada no intervalo de  $30 \leq n \leq 170$  ( $\approx 667 \leq \lambda \leq 2.051$ ) destes espectros como mostra a **Figura 2b**.

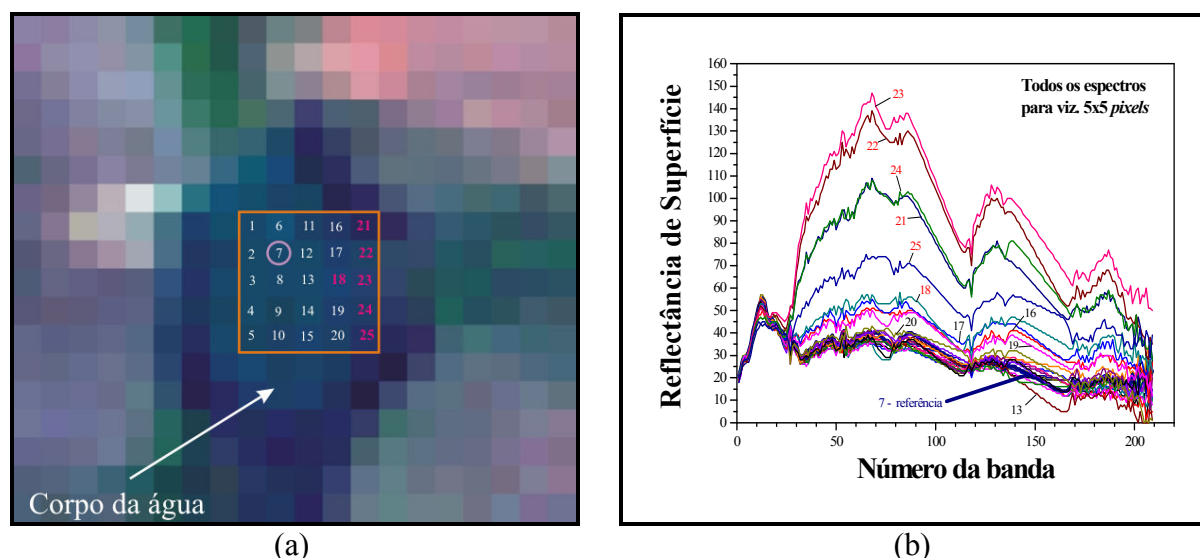


Figura 1 – (a): corpo da água pertencente à subcena 7 onde estão indicados os limites da vizinhança 5 x 5 *pixels* em torno da amostra espectral *a(c)*. (b): ilustra os espectros contidos na vizinhança da amostra espectral *a(c)*, considerando-se a vizinhança 5 x 5 *pixels*.

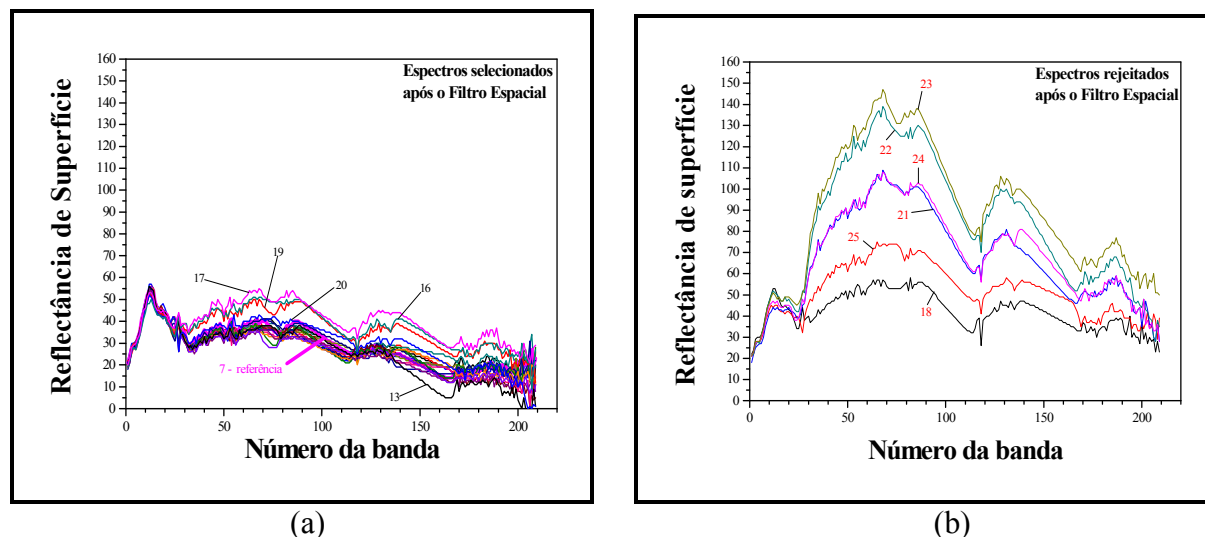


Figura 2 – Seleção espacial. (a): mostra os 19 espectros selecionados, no total de 25, espectros, para a amostra espectral *a(c)*. (b): ilustra os espectros rejeitados na vizinhança 5 x 5 *pixels* da amostra espectral *a(c)*.

O teste da homogeneidade aplicado aceitou *a(c)* como homogênea, pois  $Q_h(i_k, j_k) = 0,99 \geq 0,90$ , onde padrão de homogeneidade foi escolhido como  $\psi_h = 0,90$ .

Para o teste da redundância aplicando-se as métricas *DE* e *CE* rejeitou-se as amostras *a(b)* e *a(c)* por serem redundantes com *a(a)*, que por sua vez são todas homogêneas.

Aplicando-se a metodologia de seleção de amostras candidatas a MR nas 32 amostras escolhidas por um especialista resultou nas seguintes 10 amostras candidatas a MR: *vv1(c)*, *vv1(d)*, *vv2(b)*, *vv2(d)*, *vs(b)*, *a(a)*, *saq(a)*, *sle(c)*, *sle(d)* e *ste(c)*.

Observa-se que praticamente todas as classes e/ou subclasses de alvos estão representadas com exceção da subclasse *vv3*. As amostras desta subclasse foram eliminadas no módulo redundância. É importante observar que apesar da rejeição da metade das amostras iniciais as classes e/ou subclasses dominantes (Galvão et al., 2001) definidas como vegetação verde tipo 1 (*vv1*), vegetação seca (*vs*), areia quartzosa (*saq*), latosolo vermelho escuro (*sle*), terra roxa estruturada (*ste*) e água (*a*) estão todas presentes no conjunto de amostras selecionadas.

Utilizando-se a combinação entre as 32 amostras (supervisionada) escolhidas por um especialista e as 576 amostras extraídas aleatoriamente (não-supervisionada) da imagem, o método de seleção escolheu 178 (rejeitou 430) das amostras candidatas iniciais a MR. Dentre as amostras selecionadas continuavam as amostras das classes e/ou subclasses *vv1(d)*, *vs(a)*, *vs(b)*, *vs(c)*, *a(a)*, *a(b)*, *saq(b)*, *sle(a)*, *ste(e)*. A classe *sle* continuou a ser representada pelas amostras 65 e 84, do conjunto escolhido aleatoriamente, a subclasse *vv2* pelas amostras 96 e 98 e a subclasse *vv3* pelas amostras 121 e 126. Com isso todas as 8 classes e/ou subclasses definidas para a cena continuam tendo representação amostral no conjunto das amostras que podem ser escolhidas como MR. A seqüência aplicada dos módulos nesta combinação foi Filtro Espacial, Homogeneidade e Redundância.

## 5 – Considerações finais

Apresentou-se uma proposta de rejeição de amostras candidatas a MR em imagens hiperespectrais, baseando-se nos conceitos de pertinência de uma vizinhança (seleção espacial e espectral) e nos testes de homogeneidade e de redundância.

A metodologia proposta diminui a chance de se ter o espectro médio, representativo de uma classe e/ou subclasse de alvo, calculado entre transições entre classes e/ou subclasses ou em regiões com mistura de classes; ou com espectros com falhas nas bandas ou ainda com espectros com baixo albedo e ruidosos. Com o teste da redundância pode-se diminuir o conjunto de amostras candidatas facilitando o processo de busca exaustiva dos MR.

## Referências

- Galvão, L.S.; Pizarro, M.A., Epiphany, J.C.N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2, p. 245-255, Feb. 2001.
- Green, R.O. Retrieval of reflectance from AVIRIS-measured radiance using a radiative transfer code. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 3. Pasadena, CA, U.S.A.: JPL, 20-21 maio, 1991. **Proceedings**.NASA.JPL, 1991. p.200-210. (JPL Publication 91-28).
- Keshava, N.; Mustard, J.F. Spectral unmixing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 19, n.1, p. 44-57, Jan. 2002.
- Novaes, A.S.S.; Amaral Filho, Z.P.; Vieira, P.C.; Fraga, A.G.C. **Pedology**, Technical report of the Radam Brasil Project, v. 31, Section SE.22, p. 413-576, 1983.
- Pizarro, M.A.; **Sensoriamento remoto hiperespectral para a caracterização e identificação mineral em solos tropicais**. Jun. 1999. 185 p. (INPE-7249-TDI/693). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://iris.sid.inpe.br:1912/rep-/sid.inpe.br/deise/1999/10.22.17.45>>. Acesso em: 2004, Nov. 18.

Roberts, D.A.; Gardner, M.; Curch, R.; Ustin, S.; Scheer, G.; Green, R.O. Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 267-279, Sept. 1998.

Shanmugan, K.S.; Breipohl, A.M. **Random signals: detection estimation and data analysis**, New York, U.S.A.: John Wiley & Sons, 1988. XXVI+664p. (ISBN: 0-521-64068-7).