

# MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL EM IMAGEM DE MODERADA RESOLUÇÃO ESPACIAL

*Linear Spectral Mixture Model in Moderate Spatial Resolution Image*

*Data*

RAMON MORAIS DE FREITAS <sup>1</sup>  
VITOR HAERTEL <sup>2</sup>  
YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Centro de Sensoriamento Remoto e Meteorologia  
Caixa Postal - 15044 - Porto Alegre, RS - Brasil  
{ramon, yosio}@ltid.inpe.br  
[victor.haertel@ufrgs.br](mailto:victor.haertel@ufrgs.br)

## RESUMO

O conceito de mistura espectral apresenta várias aplicações na área de sensoriamento remoto. Esta abordagem requer, entretanto, o conhecimento a priori da resposta espectral dos membros de referência. Existem, na literatura, diferentes propostas para estimar esta resposta, como por exemplo, o uso de pixels puros, o uso de bibliotecas espectrais e a realização de medidas radiométricas de campo. Na prática, a abordagem via pixel puro tem sido a mais comumente empregada, por utilizar dados disponíveis na própria imagem. Esta abordagem vai, entretanto tornando-se gradativamente impraticável, na medida em que a resolução espacial dos dados decresce, devido às dimensões da área coberta no terreno por cada pixel. Como solução a este problema, é proposta neste estudo uma metodologia para fins de estimação de refletâncias espectrais em dados de imagens de moderada resolução espacial, empregando o modelo linear de mistura espectral (MLME) e dados de imagens de resolução espacial média, na qualidade de dados auxiliares. Objetiva-se desta forma facilitar a utilização das técnicas de mistura espectral em estudos regionais, nos quais imagens de moderada resolução espacial são freqüentemente as mais adequadas. A metodologia

proposta foi testada utilizando-se dados dos sensores CCD (20 m) e IRMSS (80 m) e WFI (260 m) a bordo da plataforma CBERS-2, na qualidade de dados de média e moderada resolução espacial, respectivamente. As refletâncias espectrais para as classes membros de referência foram estimadas para as bandas espectrais do IRMSS e WFI CBERS-2 por meio da metodologia proposta. A confiabilidade da abordagem proposta foi avaliada por meio de diagramas de espalhamento para os dados CBERS-2 e também pela comparação entre as imagens-fração, produzidas a partir dos conjuntos de dados de imagem dos sensores analisados.

**Palavras-chave:** Mistura espectral; resolução espacial moderada; dados CBERS.

### ABSTRACT

The concept of spectral mixture offers a wide range of applications in the Remote Sensing area. The application of this concept, however, requires the prior estimation of the component's (endmembers) spectral response. This latter requirement can be achieved by different methods, as reported in the literature, such as techniques for the detection of pure pixels, use of spectral libraries, and field radiometric measurements. Among those, the most often used is the pure pixel approach. In this approach, the components' spectral reflectances are estimated by means of pixels covered entirely by a single component. This approach offers the advantage of allowing the extraction of the required spectral reflectance directly from the image data. This approach, however, becomes increasingly unfeasible as the spatial resolution of the image data decreases, due to the larger ground area covered by a single pixel. In this study we propose a methodology to estimate the spectral reflectance for each component class in moderate spatial resolution image data, by applying the linear mixing model (MLME), and higher spatial resolution image data as auxiliary data. It is expected that this methodology will provide a more practical way to implement the spectral mixture approach to moderate resolution image data, allowing in this way the expansion of the information about the components' proportions across larger areas, up-scaling information in regional and global studies. Experiments were carried out using CCD (20 m ground resolution) and IRMSS (80 m ground resolution) and WFI (260 m ground resolution) CBERS-2 image data, as medium and moderate spatial resolution data, respectively. The spectral reflectances for the components in the IRMSS and WFI CBERS-2 spectral bands are estimated by applying the proposed methodology. The reliability of the proposed methodology was assessed by both analyzing scatter plots for CBERS-2 data and by comparing the fraction images produced by image data sets of the sensors analyzed.

**Keywords:** Spectral mixture; moderate spatial resolution; CBERS Data.

## 1. INTRODUÇÃO

Com os novos sistemas sensores desenvolvidos nos últimos anos, uma crescente quantidade de dados com diferentes resoluções espacial, espectral e radiométrica vem sendo colocada à disposição da comunidade internacional. A utilização combinada destes dados apresenta um grande potencial e vem sendo objeto de investigação por parte de vários pesquisadores (Price, 1999, Otazu et al., 2005, Song, 2004, Joshi et al., 2006). Uma área com grande potencial para a aplicação destes dados refere-se à questão da mistura espectral em dados de moderada resolução espacial, nos quais pixels puros dificilmente estão disponíveis. A mistura espectral ocorre sempre quando um mesmo pixel inclui duas ou mais classes espectrais, denominadas neste contexto de membros de referência. Neste caso, a resposta espectral resultante torna-se uma combinação das respostas espectrais destes membros de referência. No Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) assume-se que a resposta espectral de um pixel pode ser modelada por uma combinação linear das respostas espectrais destes membros de referência. Neste contexto, conhecida a resposta espectral do pixel e também a dos membros de referência, o objetivo é estimar a fração da área do pixel ocupada por cada um dos membros de referência. Uma maneira conveniente de expressar as frações dos membros de referência associadas a cada pixel na imagem, consiste na geração das chamadas imagens de fração. As imagens-fração apresentam um grande interesse prático, podendo ser utilizadas em várias aplicações, tais como no estudo de florestas, agricultura, uso do solo e outras (Wang, 1990; Shimabukuro & Smith, 1991; Bowles et al., 1995; Stein, 2002; Berman et al., 2004). Imagens-fração foram utilizadas com sucesso na classificação de áreas cobertas por plantações de pinus e eucaliptos (Shimabukuro & Smith, 1991) e também em estudos tratando da variação temporal na cobertura do solo (Adams et al., 1995; Carreiras et al., 2002; Haertel et al., 2004). Estudos envolvendo o problema da mistura espectral em dados imagem NOAA/AVHRR foram também relatados na literatura (Hlavka & Spanner, 1995). A metodologia proposta neste estudo tem, portanto como objetivo estender as informações contidas em imagens-fração para áreas mais extensas como aquelas cobertas por dados de moderada resolução espacial, os quais são freqüentemente utilizados em estudos de natureza regional e global. O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) requer, entretanto, o conhecimento a priori da resposta espectral de cada membro de referência, o que na prática se constitui em um problema que requer uma abordagem cuidadosa, especialmente se os valores das imagens-fração vão ser utilizados em algum tipo de modelagem. Na literatura, pode-se encontrar varias propostas para a detecção de membros de referência (Berman et al., 2004, Plaza et al., 2002, Bateson et al., 2000, Wang & Chang, 2006). Na prática, o processo mais utilizado para tal finalidade faz uso do conceito conhecido

como pixel puro, isto é, pixels disponíveis na imagem e que incluem um único membro de referência. Deve-se aqui notar que os critérios para definir um pixel como puro dependem da cena que está sendo analisada bem como da escala de trabalho. Embora prático, pois permite estimar as respostas espectrais a partir de dados disponíveis na própria imagem, esta abordagem mostra-se geralmente viável apenas para os casos de dados em alta ou média resolução espacial, isto é, para o caso de pixels que abrangem uma área de terreno relativamente reduzida. Imagens com moderada resolução espacial (Terra-MODIS, NOAA-AVHRR, CBERS WFI entre outros), apresentam limitações neste sentido, devido à dificuldade ou mesmo impossibilidade em obter-se pixels puros, isto é, os pixels presentes na imagem são todos compostos por mais de um membro de referência. Neste estudo é proposta uma nova metodologia que visa solucionar este problema. Esta proposta propõe uma versão modificada do MLME que utiliza dados de imagem em média resolução espacial como dados auxiliares.

## 2. METODOLOGIA

O MLME assume que a resposta espectral de um pixel pode ser modelada por uma combinação linear ponderada das respostas espectrais dos membros de referência. O fator de ponderação neste caso é dado pela fração da área do pixel ocupada pelo respectivo membro de referência. Para cada pixel individual, o MLME pode ser expresso por:

$$R_k = \sum_{j=1}^m r_{j,k} f_j + v_k \quad (k = 1, \dots, p) \quad (1)$$

Onde,  $R_k$  representa a resposta espectral de um pixel na banda espectral  $k$ ,  $r_{j,k}$  a resposta espectral do membro de referência  $j$  na banda espectral  $k$ ,  $f_j$  a fração da área total do pixel ocupada pelo membro de referência  $j$ ,  $m$  o número de membros de referência,  $v_k$  o valor do erro residual em (1) para a banda espectral  $k$  e  $p$  o número de bandas espectrais em consideração. As respostas espectrais  $R_k$  e  $r_{j,k}$  podem ser expressas em termos de refletância espectral, radiancia espectral ou número digital. Neste estudo, optou-se pelo número digital.

O MLME expresso pela equação (1) é normalmente utilizado para estimar as frações  $f_j$  que ocorrem em cada pixel individual, conhecendo-se as respostas espectrais  $R_k$  e  $r_{j,k}$  para as  $p$  bandas espectrais e para os  $m$  membros de referência. Para cada pixel individual, a equação (1) gera, portanto um sistema de  $p$  equações com  $m$  incógnitas. Neste caso as frações ocupadas por cada um dos membros de referência ( $f_j$ ). As frações  $f_j$  em cada pixel individual devem, obviamente, satisfazer as duas condições seguintes:

$$\sum_{j=1}^m f_j = 1 \quad \text{e} \quad f_j \geq 0 \quad \forall j \quad (2)$$

Normalmente o número de bandas espectrais  $p$  é maior do que o número de incógnitas  $m$ , resultando em um sistema de equações lineares em que o número de equações é maior do que o número de incógnitas. Um sistema com estas características não têm uma solução exata, sendo geralmente adotada uma aproximação satisfazendo um determinado critério. Neste contexto, a abordagem mais frequentemente utilizada é aquela fornecida pelo Método dos Mínimos Quadrados, no qual entre as várias possíveis soluções aproximadas se adota aquela que minimiza o somatório dos quadrados dos resíduos  $v_k$ . No presente caso, a solução deve ainda atender as duas restrições em (2).

O objetivo neste estudo consiste na estimação dos valores para as refletâncias espectrais  $r_{j,k}$ , empregando-se o MLME descrito por (1). Nesta abordagem, torna-se necessário o conhecimento prévio das frações  $f_j$ . A etapa inicial na metodologia proposta consiste, portanto na estimação das frações  $f_j$ , o que pode ser realizado pelo uso simultâneo de dois conjuntos de imagens, uma em moderada resolução espacial e uma segunda em média resolução espacial. A imagem em média resolução espacial geralmente viabiliza a existência de pixels puros para cada um dos membros de referencia, possibilitando desta forma estimar a resposta espectral ( $r_{j,k}$ ) nas bandas espectrais existentes. O MLME em (1), pode então ser implementado para estimar as frações ocupadas pelos membros de referência em cada pixel na imagem de média resolução espacial. Uma vez estimadas estas frações, a etapa seguinte consiste em registrar os dois conjuntos de imagens. O registro permitirá estimar as frações  $f_j$  para cada membro de referência nos pixels na imagem em moderada resolução espacial, a partir das frações estimadas para a imagem em resolução espacial média. Uma vez conhecidas as frações relativas a cada um dos membros de referência nos pixels da imagem de moderada resolução espacial, uma versão modificada do MLME pode ser empregada para estimar o valor das refletâncias para as membros de referência, nas bandas espectrais associadas à imagem de moderada resolução espacial. Nesta nova abordagem, o MLME (1) adquire a forma:

$$v_{i,k} = R_{i,k} - \sum_{j=1}^m f_{i,j} r_{j,k} \quad (3)$$

Com:

$$k = 1, \dots, p$$

$$i = 1, \dots, n$$

sendo,  $n$  o número de pixels,  $p$  o número de bandas espectrais,  $m$  o número de membros de referência,  $R_{i,k}$  a resposta espectral do pixel  $i$  na banda espectral  $k$ ,  $f_{i,j}$  a fração da membro de referência  $j$  no pixel  $i$ , e  $r_{j,k}$  a refletância espectral

do membro de referência  $j$  na banda espectral  $k$ , todos estes valores referentes à imagem de moderada resolução espacial.

O modelo (3) é aplicado independentemente para cada uma das bandas espectrais disponíveis nos dados em moderada resolução espacial, resultando, portanto em um sistema de  $n$  equações lineares com  $m$  incógnitas para cada banda espectral individual, sendo  $n \gg m$ . Em cada banda espectral, as refletâncias espectrais ( $r_{j,k}$ ) das  $m$  membros de referência podem ser estimadas resolvendo-se este sistema de equações lineares pelo método dos mínimos quadrados. Em notação matricial, o sistema (3) pode ser escrito como:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{R}_k - \mathbf{F} * \mathbf{r}_k \quad (4)$$

Sendo  $\mathbf{V}_k$  um vetor de dimensão  $n$ , contendo os resíduos na banda espectral  $k$ ,  $\mathbf{R}_k$  um vetor de dimensão  $n$  cujos elementos são a resposta espectral, na banda  $k$ , dos pixels utilizados,  $\mathbf{F}$  uma matriz com dimensão  $(n, m)$  cujos elementos são as frações dos membros de referência em cada pixel e  $\mathbf{r}_k$  um vetor de dimensão  $m$  contendo as incógnitas, isto é, a resposta espectral estimada para os membros de referência.

A solução deste conjunto de  $n$  equações lineares pelo método dos mínimos quadrados é obtida impondo-se a condição de que o somatório dos quadrados dos resíduos em  $\mathbf{V}_k$  seja mínimo, isto é:

$$\frac{\partial(\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k)}{\partial \mathbf{r}_k} = 0 \quad (5)$$

Utilizando-se a equação (4) o somatório dos quadrados dos resíduos  $\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k$  pode ser expresso por:

$$\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k = (\mathbf{R}_k - \mathbf{F} \mathbf{r}_k)' (\mathbf{R}_k - \mathbf{F} \mathbf{r}_k) \quad (6)$$

Expandindo o membro da direita da equação acima, obtém-se:

$$\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k = \mathbf{R}_k' \mathbf{R}_k - \mathbf{R}_k' \mathbf{F} \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{R}_k + \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{F} \mathbf{r}_k \quad (7)$$

Observando-se que a parcela  $\mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{R}_k$  é um escalar, isto é, a transposta é idêntica à direta, tem-se que:

$$\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k = \mathbf{R}_k' \mathbf{R}_k - 2 \mathbf{R}_k' \mathbf{F} \mathbf{r}_k + \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{F} \mathbf{r}_k \quad (8)$$

Minimizando  $\mathbf{V}'_k \mathbf{V}_k$  com respeito às incógnitas  $\mathbf{r}_k$  obtêm-se:

$$\frac{\partial(\mathbf{V}'_k \mathbf{V}_k)}{\partial \mathbf{r}_k} = -2\mathbf{R}'_k \mathbf{F} + \mathbf{r}'_k \mathbf{F}' \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (9)$$

Assumindo que a matriz  $(\mathbf{F}'\mathbf{F})$  é não singular, a solução pelo critério dos mínimos quadrados é dada por:

$$\mathbf{r}_k = (\mathbf{F}'\mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}' \mathbf{R}_k \quad (10)$$

Na prática ocorre por vezes a presença de pixels ruidosos no conjunto de dados. Estes pixels podem ser detectados por meio da análise dos resíduos em  $\mathbf{V}_k$ . Normalmente, estes resíduos podem ser modelados por uma distribuição normal, permitindo desta forma a detecção de pixels com alto resíduo. Estes pixels podem então ser removidos do conjunto de dados e as incógnitas  $\mathbf{r}_k$  novamente estimadas. A remoção dos 5% ou 10% dos pixels de maior resíduo mostra ser eficiente.

### 3. EXPERIMENTOS

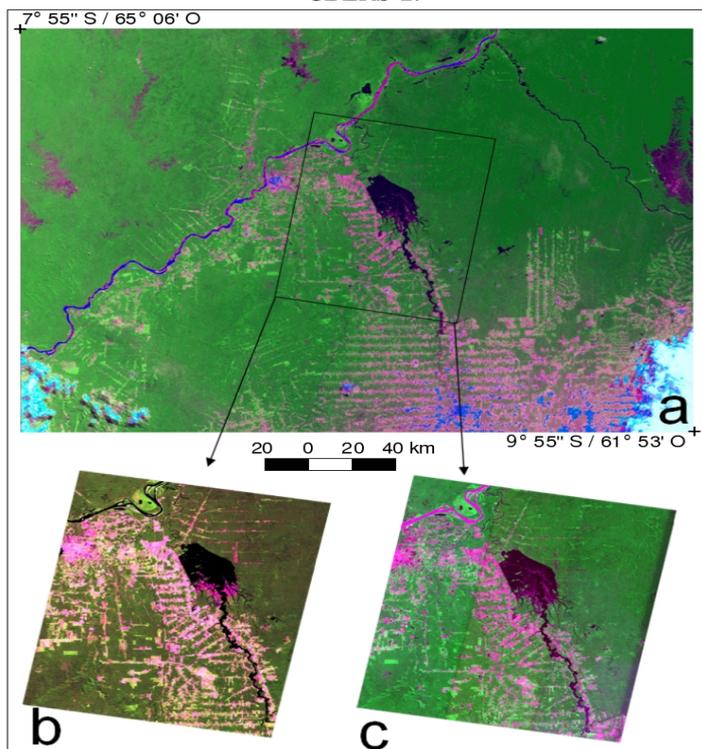
A metodologia proposta neste estudo foi testada utilizando imagens IRMSS (80 m) e WFI (260 m) como dados de moderada resolução espacial e a imagem CCD (20 m) como dados de média resolução espacial. Definem-se nesse trabalho para o propósito da investigação duas classes de resolução espacial: Média atribuída às imagens CCD (20 metros) e Moderada atribuída às imagens IRMSS (80 m) e WFI (260 m). As bandas espectrais disponíveis nestes sensores, a bordo da plataforma CBERS-2 são apresentadas na Tabela 1. As rotinas computacionais necessárias à implantação da metodologia proposta foram implementadas em ambiente MATLAB. A área de estudo (Figura 1) escolhida para validação da metodologia inclui uma cena no estado de Rondônia, correspondente a órbita ponto 175/110 dos sensores CCD e IRMSS. A imagem do WFI, que engloba a cena destes sensores, mostra o reservatório de Samuel situado próximo à cidade de Porto Velho. Esta região de estudo é representada pela floresta tropical densa com áreas alteradas pela ocupação humana. Neste estudo, foram considerados três membros de referência: vegetação verde, solo exposto e sombra.

**Tabela 1** – Características espectrais e espaciais dos sensores a bordo da plataforma CBERS-2.

<b>Sensores</b>	<b>Resolução Espectral</b>	<b>Resolução Espacial</b>
CCD	0,52 - 0,59 $\mu\text{m}$ (verde) 0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ (vermelho) 0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$ (infravermelho próximo)	20 x 20 m.
IRMSS	0,50 - 1,10 $\mu\text{m}$ (pancromática) 1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$ (infravermelho médio) 2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$ (infravermelho médio)	80 x 80 m.
WFI	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ (vermelho) 0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$ (infravermelho próximo)	260 x 260 m.

O experimento foi desenvolvido segundo as etapas propostas na seção de Metodologia. Na etapa inicial, o MLME (1) juntamente com as restrições (2) foi aplicado às imagens de média resolução espacial (CCD), empregando-se a abordagem de pixels puros, e gerando desta forma imagens-fração para cada um dos três membros de referência. A seleção dos membros de referência nas imagens CCD foi baseada no critério de membro de imagem (image endmember), ou seja, extraído diretamente das imagens CCD observando o comportamento espectral (forma da curva) e o diagrama de espalhamento entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Em seguida foram estimadas as frações para os membros de referência para pixels nas imagens de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI). A operação de registro das imagens neste caso ficou facilitada pelo fato de que as imagens foram coletadas simultaneamente pelos três sistemas sensores a bordo da plataforma CBERS-2. O registro entre as imagens foi realizado no software SPRING com erro quadrático médio inferior a 1 pixel das imagens correspondentes CCD (< 20 m), IRMSS (< 80 m) e WFI (< 260 m).

**Figura 1:** Composição colorida (RGB) da área de estudo: (a) imagem WFI (R1 G2 B1); (b) IRMSS (R3 G1 B2); e (c) CCD (R2 G3 B1) da plataforma CBERS-2.



Somente para aplicação da metodologia e recuperação dos membros de referência as imagens foram reamostradas para resolução espacial da imagem CCD (20 m), neste procedimento foi utilizado o interpolador vizinho mais próximo por preservar o valor radiométrico dos dados. Finalmente aplicou-se o modelo transformado (10) aos dados de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI) obtendo-se assim os valores estimados para as refletâncias espectrais dos membros de referência nas bandas espectrais destes dois sistemas sensores. Os valores estimados para as refletâncias espectrais para os sistemas IRMSS e WFI estão relacionados na Tabela 2. Esses valores foram normalizados para o intervalo [0,1], dividindo os valores de Nível Digital (ND) por 255 (8 bits). Ressalta-se que neste trabalho a terminologia refletância espectral refere-se apenas o número digital normalizado entre 0 e

1. Esse procedimento foi adotado porque nesse trabalho não há interesse no estudo do comportamento espectral dos alvos em termos de recuperação de parâmetros biofísicos. Não sendo necessário nesse caso, as etapas de correções radiométricas e atmosféricas das imagens.

**Tabela 2:** Resposta espectral dos pixels puros estimados em número digital normalizado 0-1.

<b>Banda</b>	<b>Solo</b>	<b>Sombra</b>	<b>Vegetação</b>
<b>IRMSS</b>			
PAN	0,41	0,11	0,39
IVM 1	0,54	0,03	0,25
IVM 2	0,30	0,01	0,09
<b>WFI</b>			
Vermelho	0,34	0,19	0,22
IVP	0,45	0,12	0,51

A avaliação do grau de precisão obtido nos valores estimados para as refletâncias espectrais (ND normalizados), foi feita de duas maneiras: (1) analisando o diagrama de dispersão envolvendo valores de refletância espectral para pixels nas imagens coletadas pelos sensores IRMSS e WFI e (2) comparando as imagens-fração produzidas pelos três sensores utilizados.

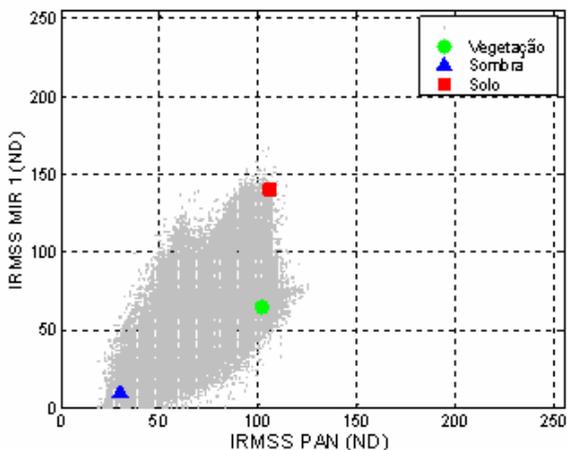
No primeiro caso, os dados da imagem devem estar localizados dentro do diagrama de espalhamento, enquanto que os pontos associados aos três membros de referência devem estar localizados junto aos vértices. O diagrama de dispersão envolvendo as bandas espectrais do visível e infravermelho próximo (PAN) e do infravermelho médio é apresentado na Figura 2 para os dados do sensor IRMSS. De maneira similar, o diagrama de dispersão envolvendo as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo é apresentado na Figura 3 para os dados do sensor WFI. Pode-se observar que em ambos os casos, a posição ocupada pelos três membros de referência aproxima-se bastante daquela teoricamente correta, sugerindo assim que um razoável grau de exatidão foi atingido pelo modelo proposto, ao estimar os valores para a refletância espectral dos membros de referência nas bandas espectrais dos sensores IRMSS e WFI.

A avaliação da metodologia proposta foi também realizada comparando as imagens-fração produzidas pelo MLME (1), utilizando dados dos três sistemas sensores a bordo da plataforma CBERS-2. No caso dos dados em média resolução espacial (CCD), as respostas espectrais, foram estimadas utilizando a técnica dos pixels puros. No caso dos dados fornecidos pelos sensores de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI) foram utilizadas as respostas espectrais produzidas pelo modelo proposto. As imagens-fração de

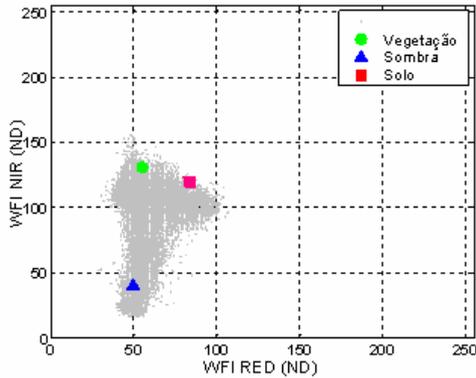
vegetação verde, sombra e solo, derivadas dos sensores CCD, IRMSS e WFI, bem como os respectivos histogramas, são apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente. Nestas figuras, os eixos das imagens-fração representam as coordenadas em pixels. Com isso pode ser observado, que a resolução espacial das imagens não foi alterada, ou seja, para a mesma área o número de pixels é dependente da resolução espacial de cada sensor. Como pode ser observado, as imagens-fração derivadas desses sensores são muito semelhantes entre si, sugerindo assim que os valores estimados para as refletâncias espectrais dos membros de referência nas bandas espectrais das imagens de moderada resolução espacial, são razoavelmente precisos.

A Tabela 3 mostra que quantitativamente esses valores também são semelhantes. Essa concordância entre as imagens-fração pode ser entendida como uma comprovação adicional da confiabilidade dos resultados produzidos pelo modelo proposto (10).

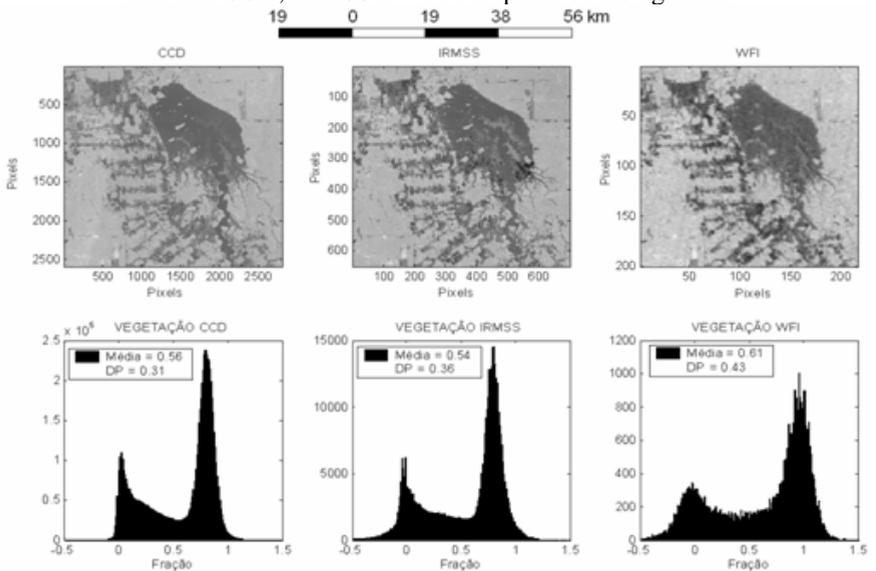
**Figura 2 :** Diagrama de dispersão para os dados fornecidos pelo sensor IRMSS. Observa-se que as respostas espectrais (ND 8 Bits) estimadas para os membros de referência compreendem pixels localizados corretamente próximo aos vértices.



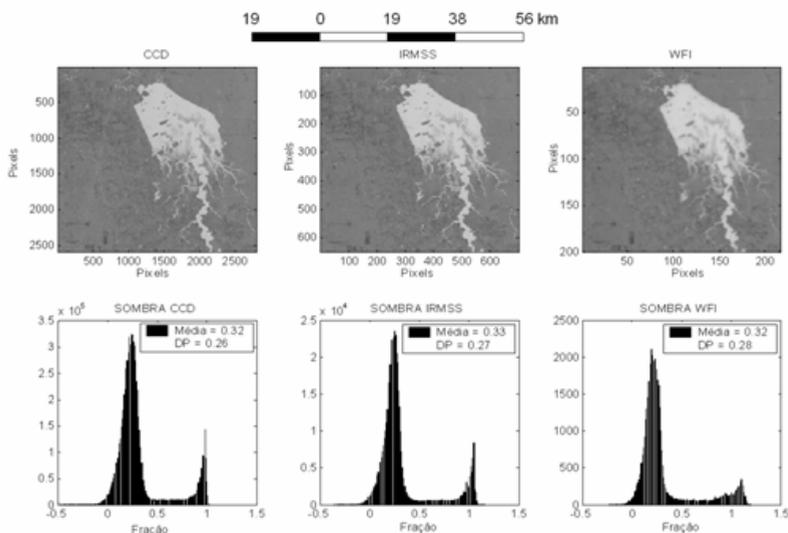
**Figura 3:** Diagrama de dispersão para os dados fornecidos pelo sensor WFI. Observa-se que as respostas espectrais (ND 8 Bits) estimadas para os membros de referência correspondem a pixels localizados corretamente próximo aos vértices.



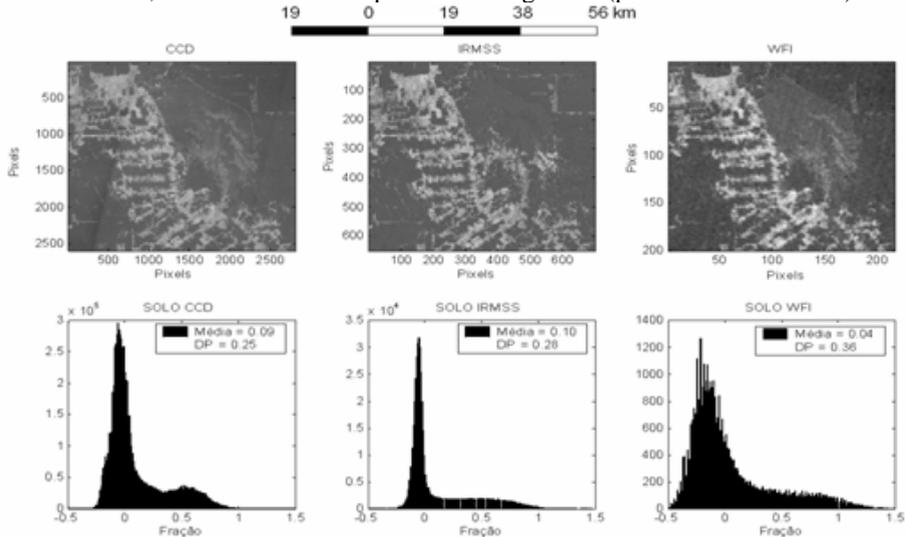
**Figura 4:** Imagens-fração para o membro de referência vegetação verde derivadas dos sensores CCD, IRMSS e WFI e respectivos histogramas.

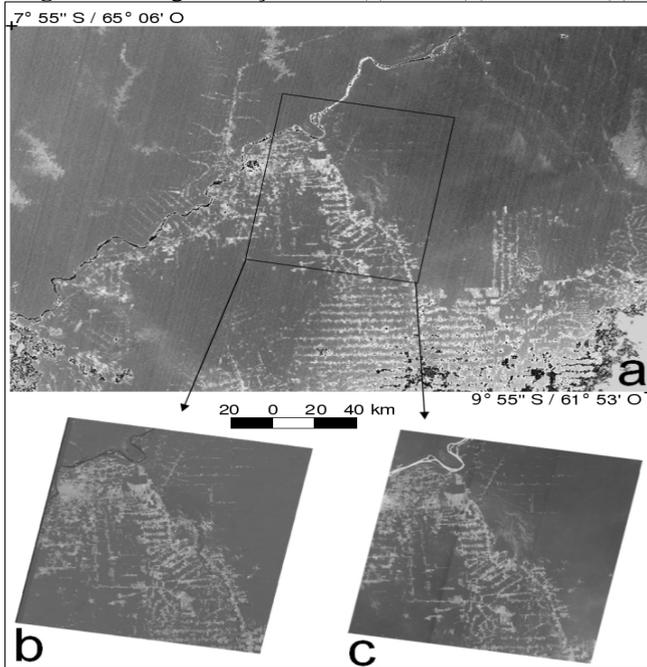


**Figura 5:** Imagens-fração para o membro de referência sombra derivadas dos sensores CCD, IRMSS e WFI e respectivos histogramas.



**Figura 6:** Imagens-fração para o membro de referência solo derivadas dos sensores CCD, IRMSS e WFI e respectivos histogramas (plataforma CBERS-2).



**Figura 7:** Imagem-fração solo: (a) WFI, (b) IRMSS e (c) CCD.**Tabela 3:** Média e desvio padrão das proporções dos membros de referência para os pixels dos sensores do CBERS-2 (normalizados 0 - 1).

	Sensor	Média	Desvio Padrão
<b>Solo</b>	CCD	0,09	0,25
	IRMSS	0,10	0,28
	WFI	0,04	0,36
<b>Sombra</b>	CCD	0,32	0,26
	IRMSS	0,33	0,27
	WFI	0,32	0,28
<b>Vegetação</b>	CCD	0,56	0,31
	IRMSS	0,54	0,36
	WFI	0,61	0,43

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi proposta uma nova abordagem para estimar as respostas espectrais dos membros de referência dos membros de referencia em imagens de resolução espacial moderada. Testes foram realizados com dados imagem de moderada resolução espacial dos sensores IRMSS e WFI onde três

membros de referência estavam presentes: vegetação verde, solo e sombra. A precisão dos valores estimados pelo modelo proposto para as respostas espectrais dos membros de referência foi avaliada por meio de análise dos diagramas de dispersão utilizando as bandas espectrais dos sensores IRMSS e WFI, e pela comparação das imagens-fração produzidas utilizando as respostas espectrais estimadas pela metodologia proposta com aquelas produzidas pela técnica tradicional do pixel puro. No diagrama de dispersão, os valores estimados para as respostas espectrais dos membros de referência localizam-se próximos aos vértices no diagrama de espalhamento formado pelos dados das imagens, ilustrando assim a confiabilidade do método proposto. As imagens-fração produzidas utilizando os dados do IRMSS e WFI e as respostas espectrais estimadas para os membros de referência são muito similares à aquelas obtidas a partir dos dados do sensor CCD, para o qual foi empregada a técnica tradicional do pixel puro. Essas análises sugerem que as respostas espectrais estimadas são aceitáveis, demonstrando a confiabilidade do modelo proposto. Como uma das principais aplicações da metodologia proposta, pode-se mencionar a possibilidade de estender as informações das proporções dos membros de referência de um nível local para um nível mais regional (Figura 7). Embora não tenha sido implementado nesse estudo, uma avaliação dos resultados poderia ter sido feita utilizando as imagens de erro. Como pode ser visto, esta metodologia é aplicável para sensores com resoluções espacial e espectral diferentes. Portanto, esta metodologia se apresenta como uma maneira alternativa de escalonar as informações para estudos regional e global.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores desejam expressar seu agradecimento ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela disponibilidade das imagens CBERS 2 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq processo 132140/2005-5.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ADAMS, J. B., SABOL, D. E., KAPOV, V., ALMEIDA-FILHO, R., ROBERTS, D. A., SMITH, M. O., GUILLESPIE, A. R., *Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon*. Remote Sensing of Environment, vol. 52, pp. 137-152, 1995.

- BATESON, C.A., ASNER, G.P., AND WESSMAN, C.A., *Endmember bundles: a new approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 2, pp. 1083-1094, 2000.
- BERMAN, M., KIIVERI, H., LAGERSTROM, R., ERNST, A., DUNNE, R., AND HUNTINGTON, F., *ICE: a statistical approach to identifying endmembers in hyperspectral images*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, No. 10, pp. 2085-2095, 2004.
- BOWLES, J., PALMADESSO, P., ANTONIADES, J., BAUMBACK, M., *Use of filter vectors in hyperspectral data analysis*. Proceedings of SPIE, vol. 2553, pp. 148-157, 1995.
- CARREIRAS, J.M.B., SHIMABUKURO, Y.E., PEREIRA, J.M.C., *Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil*. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, No. 23, pp. 4979-4983, 2002.
- CHANG, C., JI, B., *Fisher's linear spectral mixture analysis*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 8, pp. 2292 – 2304, 2006
- HAERTEL, V., SHIMABUKURO, Y. E., ALMEIDA-FILHO, R., *Fraction images in multitemporal change detection*. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, No. 23, pp. 5473-5489, 2004.
- HLAVKA, C. AND SPANNER, M., *Unmixing AVHRR imagery to assess clearcuts in forest regrowth in Oregon*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, No. 3, pp. 788-795, 1995.
- JOSHI, M.V., BRUZZONE, L., AND CHAUDHURI, S., *A Model-Based Approach to Multiresolution Fusion in Remotely Sensed Images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 9, pp. 2549-2562, 2006.
- OTAZU, X., GONZALEZ-AUDICANA, M., FORS, O., AND NUNEZ, J., *Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 10, pp. 2376-2385, 2005.
- PLAZA, A., MARTINEZ, P., PEREZ, R., AND PLAZA, J., *Spatial/spectral endmember extraction by multidimensional morphological operations*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 9, pp. 2025-2041, 2002.

- PRICE, J. J., *Combining Multispectral Data of Different Spatial Resolution*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, No. 3, pp. 1199-1203, 1999.
- SHIMABUKURO, Y.E. AND SMITH, J.A., *The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images Derived from Remote Sensing Multispectral Data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.29, No. 1, pp. 16-20, 1991.
- SONG, C., *Cross-sensor calibration between Ikonos and Landsat ETM+ for spectral mixture analysis*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 1, No. 4, pp. 272-276, 2004.
- STEIN, W.J., *Normal composition models: generalizations and applications*. Proceedings of SPIE, vol. 4725, pp. 216-224, 2002.
- WANG, F., *Fuzzy supervised classification of remote sensing images*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, No. 2, 1990.
- WANG, J., AND CHANG, C.I., *Applications of Independent Component Analysis in Endmember Extraction and Abundance Quantification for Hyperspectral Imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 9, pp. 2601-2616, 2006.

(Recebido em setembro/07. Aceito em novembro/07)