

Caracterização da refletância espectral de materiais urbanos com imagens do sensor HSS

Romero da Costa Moreira^{1,2}
Lênio Soares Galvão²
Ruy Morgado de Castro¹

¹Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
Caixa Postal 6044 – 12.231-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
{moreira, rmcastro}@ieav.cta.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
lenio@dsr.inpe.br

Abstract. This paper describes spectral reflectance characteristics of urban area materials measured with the airborne HSS (Hyperspectral Scanner System)/SIVAM. A 2.7 m spatial resolution HSS radiance image of São José dos Campos city, in São Paulo state (Brazil), was atmospherically corrected using FLAASH algorithm to retrieve surface reflectance. An EFFORT polishing was applied to minimize artifacts due to atmospheric correction. Image reflectance spectra were compared with field and laboratory reflectance measurements (FieldSpec instrument) of different materials to assess the quality of reflectance retrieval. Results showed that HSS was able to measure typical spectral absorption features of green vegetation, soil and water bodies. From the comparison between HSS and FieldSpec measurements, some man made materials presented well-matched spectra between the two levels of data acquisition, and red ceramic tiles presented well-defined clay minerals and iron oxides spectral features. Distinction between aluminum and galvanized steel roofs was possible as well as identification of PVC (Polyvinyl Chloride) covers because of their typical features near 2150 nm and 2325 nm.

Palavras-chave: remote sensing, hyperspectral imaging, imaging spectrometry, urban spectrometry HSS sensor, SIVAM, sensoriamento remoto, imageamento hiperespectral, espectrometria por imageamento, espectrometria urbana, sensor HSS, SIVAM.

1. Introdução

Tradicionalmente, as diversas aplicações do sensoriamento remoto hiperespectral têm abordado a possibilidade de identificação de minerais em rochas e solos, sedimentos em suspensão ou algas em corpos d'água, e de variáveis biofísicas da vegetação (Liang, 2004). Mais recentemente, no entanto, alguns estudos com dados hiperespectrais têm se voltado para a investigação de áreas urbanas, na busca do conhecimento de características e problemas resultantes da ação antrópica. Entre esses estudos, conforme enumeram Herold et al. (2004), podem ser citados: o mapeamento de superfícies impermeáveis, como arruamentos, estradas e pátios pavimentados, telhados e áreas revestidas em geral, para a avaliação do sistema hidrológico e potencial de risco a alagamento; e a identificação do impacto das propriedades de refletância de materiais dessas áreas no balanço energético e no clima local.

Imagens do sensor hiperespectral Hyperion (Ungar et al., 2003), de 220 canais, a bordo do satélite *Earth Observing* (EO-1), podem ser adquiridas comercialmente há algum tempo para fins de estudos hiperespectrais. Com esses dados, entretanto, em virtude da resolução espacial de 30 metros, torna-se difícil uma avaliação espectral mais minuciosa de alvos de dimensões reduzidas, que caracterizam as áreas urbanas em geral. Imagens orbitais do sensor hiperespectral multiangular Chris/Proba podem ser obtidas com melhor resolução espacial que as do Hyperion/EO-1, mais a faixa de aquisição de dados é limitada ao visível e ao infravermelho próximo (400 a 1000 nm).

A alternativa para estudos espectrais que exijam maior detalhamento espacial pode ser obtida com a exploração de dados de sensores hiperespectrais aerotransportados capazes de adquirir imagens com resolução espacial melhor que 10 metros. No Brasil, uma das opções é o sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*) (Souza Filho, 2004; Moreira et al., 2004), adquirido para o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). O HSS possui uma boa distribuição espectral de suas bandas nas faixas do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas (400 a 2500 nm), e tem como vantagem a possibilidade de aquisição de dados em várias escalas (dependente apenas da altura do voo), além de ser um sensor de propriedade nacional, o que torna mais fácil o acesso a imagens de características hiperespectrais no país.

Em maio de 2006, durante uma campanha de avaliação do sensor HSS, foram adquiridas imagens da cidade de São José dos Campos. Uma dessas imagens, após a correção atmosférica, foi utilizada para o estudo espectral de materiais da área urbana. Em uma avaliação preliminar, os espectros de pixels da imagem reflectância foram comparados às curvas de reflectância obtidas em campo e laboratório com o espectrômetro FieldSpec. Os resultados são apresentados neste trabalho.

2. Materiais e Método

O sensor HSS dispõe de 50 canais, dos quais 21 posicionados na região do VNIR (*Visible and Near Infrared*), 16 na região do SWIR (*Shortwave Infrared*), 7 na região do MWIR (*Middle Wave Infrared*) e 6 na região do TIR (*Thermal Infrared*). A aquisição das imagens pode ser ajustada em 5 frequências de rotação do espelho de varredura (Moreira et al., 2004), o que possibilita uma ampla variação de velocidades da plataforma e alturas de voo. Para uma determinada velocidade de voo da plataforma, a utilização de frequências de rotação mais altas permitirá um imageamento a uma menor altura de voo e, conseqüentemente, uma melhor resolução espacial, com menores valores de GIFOV (*Ground Instantaneous Field of View*). Entretanto, conforme apresentam Castro et al. (2004), verifica-se um menor nível de ruído das imagens do HSS à frequência de 12,5 Hz, o qual aumenta na utilização da menor e das maiores frequências.

Para o presente trabalho, com foco na espectrometria de reflectância, foram utilizados apenas os 37 canais do VNIR–SWIR, que abrangem o intervalo espectral de 430 a 2360 nm. Quanto à frequência de rotação do espelho, essa foi estabelecida em 25 Hz por haver sido considerada a frequência que possibilita o melhor custo benefício, quanto à relação da resolução espacial com o ruído inerente ao dado. Por esta opção era esperado um ruído ligeiramente superior ao proporcionado na frequência de 12,5 Hz, mas o GIFOV, aspecto preponderante na análise do espaço intra-urbano, seria reduzido à metade, proporcionando uma melhor discriminação dos alvos.

A imagem utilizada neste estudo, selecionada com base na disponibilidade de boa variedade de alvos da área urbana e pela facilidade de acesso para avaliações de campo, abrange uma área de 4,5 km de extensão por 2 km de faixa, com resolução de 2,7 m (GIFOV ao Nadir). Nem toda a largura de faixa foi utilizada para o estudo em virtude da visível anisotropia, motivada pela geometria de iluminação e visada – a posição relativa do sensor ao Sol. Nas imagens obtidas no eixo Oeste–Leste verificou-se forte efeito de retroespalhamento da iluminação do Sol, ou *hot spot*, que ilumina de Norte na localidade. Em tais imagens, a metade da cena ao sul, mais iluminada do ponto de visada do sensor, apresenta-se progressivamente mais brilhante no sentido da borda sul, enquanto a metade ao norte, integrando uma maior área sombreada, aparece progressivamente mais escura no sentido da borda norte. Nas imagens obtidas com a aeronave alinhada com o Sol – aprofada ou deixando-o à retaguarda – tal anisotropia não ocorre, e as imagens apresentam melhor aspecto visual. Contribui para a ocorrência desse efeito o fato de o HSS possuir um amplo campo de visada

(FOV), com 86°, o que também motiva uma influência atmosférica mais intensa nas bordas, devido ao aumento da trajetória óptica.

A fim de minimizar variações espectrais devidas à anisotropia dos alvos, as análises foram restritas à região de aproximadamente 50° centrais da faixa adquirida, entre -25° e +25° de visada. Não foram realizadas as correções geométricas disponibilizadas no aplicativo de processamento do HSS, como a correção “V/H” e a compensação de visada “*S-bend*”, ou aplicáveis com o pós-processamento, como o georreferenciamento da imagem. Dessa forma, a imagem foi preservada com a geometria na qual foi gerada. Apenas processamentos radiométricos foram realizados. Inicialmente, para a obtenção da imagem radiância. Posteriormente, a imagem radiância foi corrigida dos efeitos atmosféricos e convertida para reflectância de superfície com o aplicativo FLAASH (Research Systems, 2004), tomando-se como parâmetros a coordenada central, a altitude de voo e o horário de aquisição do ponto central da área. A elevação do terreno foi obtida em uma carta topográfica de 1:50.000, do IBGE, adotando-se a altitude da região central da cena. Diversas correções foram realizadas com a variação de parâmetros de modelos atmosféricos (Tropical e *Middle Latitude Summer – MLS*) e de aerossóis (Urbano e Rural), bem como das opções de correção dos efeitos de espalhamento e de vapor d’água com estimativa de razões de bandas.

A imagem reflectância obtida com o FLAASH foi, então, submetida à filtragem espectral parcial com o algoritmo EFFORT, para a minimização de ruídos decorrentes da correção atmosférica, em dois segmentos: um polinômio de 3ª ordem foi selecionado para o segmento espectral limitado à região próxima a 940 nm, de influência do conteúdo de vapor d’água da atmosfera; e um polinômio de 2ª ordem para a região de 2000 nm, esta influenciada pela concentração de dióxido de carbono (CO₂). Dados de radiância e espectros de reflectância de um pátio de concreto, obtidos em campo durante a passagem do sensor, serviram como referência para a avaliação dos valores de radiância e da qualidade da correção atmosférica da imagem. A imagem cuja média espectral do pátio mais se aproximou da média espectral de campo foi utilizada na análise espectral, que consistiu na comparação dos espectros dos pixels com as curvas de reflectância obtidas em campo e laboratório com o espectrômetro FieldSpec - ASD (*Analytical Spectral Devices, Inc.*), instrumento de 2151 canais com abrangência espectral de 350 a 2500 nm, cujo intervalo de amostragem é de 0,7 nm no VNIR e de 2 nm no SWIR. Todas as medições com o FieldSpec foram realizadas com o FOV de 25° e, em alguns casos, foi utilizada uma plataforma com braço articulado para auxiliar medições de alturas variadas, possibilitando a projeção sobre os telhados de edificações. Uma placa de Spectralon (*Labsphere, Inc*) foi utilizada como padrão difusor nas medições de reflectância.

3 Resultados e Discussão

A imagem obtida em voo perpendicular ao eixo de iluminação apresenta visível efeito do retroespalhamento. Com o Sol iluminando de Norte, verifica-se um brilho mais intenso do setor sul da imagem. Tal efeito é mais evidente nas áreas edificadas, onde o retroespalhamento é maior, como pode ser observado na parte inferior da **Figura 1**.

A coerência dos valores de radiância da imagem foi preliminarmente avaliada a partir de dados de medições de campo. A radiância média de 575 pixels de um pátio de concreto foi comparada diretamente à média de oito espectros tomados no alvo durante a passagem do HSS. Para tal comparação, a radiância de campo, de melhor resolução espectral, foi devidamente ponderada pelas funções de resposta de banda do HSS no VNIR–SWIR, a fim de que fosse obtida a equivalência na largura e no posicionamento espectral do sensor. Na **Figura 2**, pode-se observar que o valor da radiância média do alvo tem, em geral, boa aproximação com o valor médio de campo. As diferenças entre as médias de radiância são atribuídas à desigualdade das áreas abrangidas na visada dos sensores na região amostrada do

alvo, ao intervalo de aquisição de dados das amostras de campo (mais demorada que o tempo de imageamento com o sensor) e, principalmente, às variações atmosféricas.



Figura 1 – Imagem HSS de trecho da cidade de São José dos Campos entre os bairros Parque Industrial (esquerda) e Vista Verde (direita). A parte inferior apresenta-se mais brilhante, efeito do retroespalhamento da iluminação solar, mais visível nas áreas edificadas.

O pátio de concreto, apesar de não ser rigorosamente homogêneo nem espectralmente isotrópico como desejável, foi o objeto acessível da região com melhores características para a obtenção de verdades de campo. Por esse aspecto, tal pátio também foi utilizado como referência para a avaliação dos resultados da correção atmosférica da imagem.

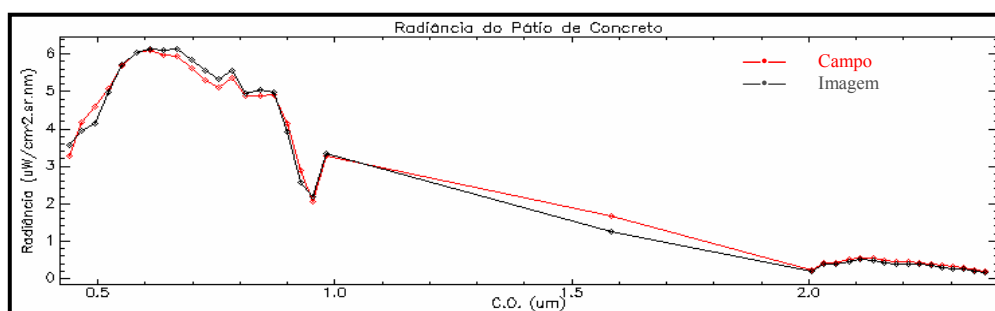


Figura 2 – Radiância ($\mu\text{W}/\text{m}^2.\text{sr}.\text{nm}$) média de 575 pixels do pátio de concreto obtida da imagem HSS (linha preta) e da média de 8 espectros de medições de campo (linha vermelha) realizadas durante o imageamento. As marcações nas linhas identificam o posicionamento dos 37 canais do VNIR e SWIR do HSS.

A correção cujos espectros da imagem melhor se ajustaram aos espectros de campo foi obtida com o modelo Tropical de atmosfera e o modelo Urbano de aerossóis, sem a utilização da opção de processamento com a estimativa K-T (Kauffman-Tanré) de aerossóis, ou da estimativa WR (*Water Retrieval*) de vapor d'água. Para a correção do vapor d'água foi utilizada a opção de multiplicador WCM (*Water Column Multiplier*) de valor fixo de 0.35. A concentração de CO_2 utilizada foi a sugerida no guia do usuário do FLAASH, em 390, mas testes posteriores indicaram que ajustes a menor nesse parâmetro podem trazer benefícios à correção na região de 2000 nm. Na **Figura 3**, a média de reflectância do pátio de concreto obtida com a correção FLAASH é comparada com a média de medições de reflectância de campo. Nessa comparação também foi utilizado o espectro médio de campo ponderado para as funções de resposta de banda dos 37 canais do VNIR–SWIR do HSS. Apesar de as diferenças na magnitude dos espectros de reflectância do pátio serem crescentes no sentido dos canais com maiores comprimentos de onda, verificou-se uma boa aproximação nos perfis espectrais de campo e da imagem corrigida, exceto pelas variabilidades próximas a 940 nm, onde persiste uma feição de absorção – indicando uma subcorreção da influência do vapor d'água – e a 2000 nm, onde se evidencia uma elevação – indício de sobrecorreção da influência da concentração de CO_2 .

Deve-se considerar, entretanto, que a concentração desses constituintes pode sofrer razoável variabilidade ao longo de uma cena tão heterogênea, como o trecho de área urbana

utilizado neste trabalho, sendo esperada a ocorrência de áreas de melhor e de pior ajuste da correção. Nesse aspecto, a filtragem EFFORT, quando utilizada em regiões espectrais consideradas ruidosas, pode atenuar a variabilidade do dado, resultando em um melhor aspecto visual dos espectros. O melhor resultado do EFFORT neste trabalho foi obtido com a utilização de um polinômio de 3ª ordem no segmento delimitado pelos canais 14 a 20, região de 940 nm, e de 2ª ordem no outro segmento, do canal 22 a 26, região de 2000 nm.

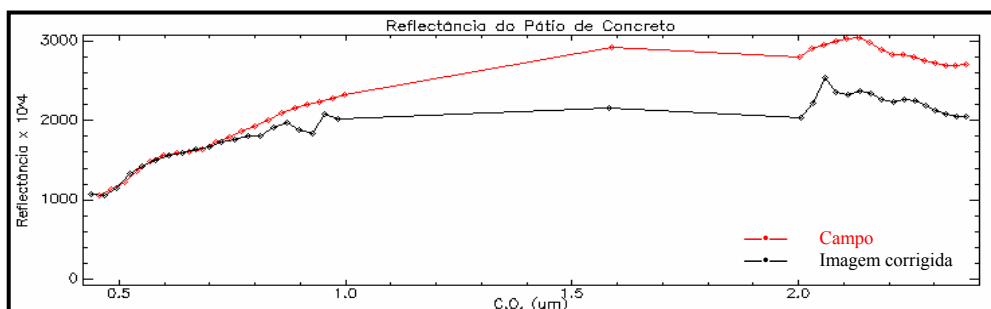


Figura 3 – Reflectância média (575 pixels) do pátio de concreto da imagem HSS corrigida com o aplicativo FLAASH (linha preta) e da média de 5 espectros de campo (linha vermelha). Valores de reflectância multiplicados por 10^4 .

Os resultados do processamento também podem ser avaliados a partir de espectros de alvos naturais comuns. Na **Figura 4** são apresentados os espectros de vegetação, solo exposto e dois corpos d'águas. Ao lado de cada espectro é apresentado o recorte da imagem em composição colorida normal: R(Canal 9)G(Canal 5)B(Canal 2).

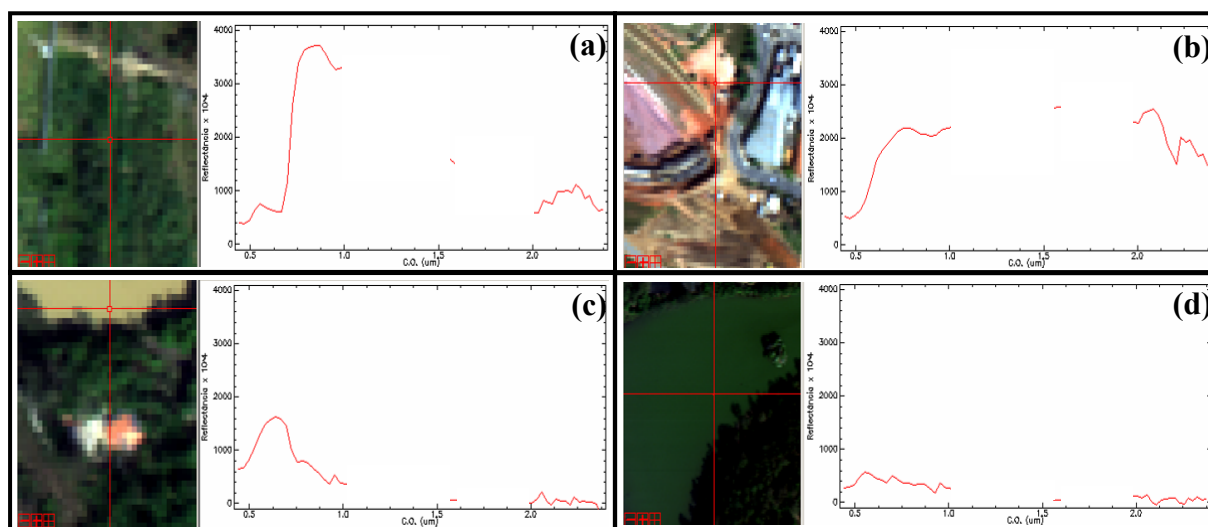


Figura 4 – Espectros de reflectância (valor multiplicado por 10^4) de alvos naturais comuns obtidos na imagem corrigida com o FLAASH e suavizada com o EFFORT nas regiões de 940 e 2000 nm. São apresentados espectros de: vegetação de várzea (a); solo exposto em um corte do terreno (b); lagoa com sedimentos inorgânicos (c); e lagoa com fitoplânctons (d).

A **Figura 4(a)** refere-se a uma vegetação sadia de várzea, com predominância de gramíneas e arbustos, cujo espectro apresenta baixa reflectância no visível, com predomínio da absorção nos canais do azul e do vermelho, resultado da absorção por pigmentos das folhas, e nítida presença da borda vermelha em 700 nm, devida à reflexão múltipla na estrutura celular. A feição de absorção devida à água das folhas, próximo a 960 nm, também é observada no NIR. No SWIR, verifica-se o formato convexo típico, de reflectância inferior a 0.1. Na **Figura 4(b)**, uma amostra de solo exposto no corte para obras de pavimentação,

observa-se o espectro típico de um solo argiloso, com feições de absorção por óxidos de ferro no VNIR e uma banda de absorção pronunciada em 2200 nm, típica da absorção por Caulinita. Em (c) e em (d) são identificadas feições típicas de corpos d'água: o primeiro (c), com grande concentração de sedimentos inorgânicos suspensos, tem maior reflectância na região do vermelho, a qual reduz-se rapidamente a partir do NIR, e atinge valores próximos a zero no SWIR; no segundo corpo d'água (d), o SWIR também indica valores muito baixos, como esperado para a água, mas a presença de fitoplânctons proporciona a coloração esverdeada do alvo, devida à maior absorção no azul e no vermelho.

Assim como o concreto, os espectros de outros alvos constituídos de materiais manufaturados mais comuns em áreas urbanas, como o asfalto de pavimentos, o fibrocimento, a cerâmica de argila e os metais de telhados não apresentam, em geral, feições destacáveis de absorção que facilitem sua identificação por técnicas de processamento de dados hiperespectrais. Esses materiais, entretanto, podem ser discriminados entre si pelo formato geral de seus espectros, devendo-se atentar para a grande variabilidade proporcionada pelas condições da superfície. A impregnação por outros materiais (p.ex. solo, fuligem e óleo), a proliferação de fungos e vegetação, a água das chuvas, e o próprio desgaste da superfície, que modifica a sua rugosidade, podem resultar em grandes variações espectrais. Tais processos ocorrem normalmente com o uso, muitas vezes proporcionados pela mera exposição ao tempo. Os metais, em geral, sofrem gradual oxidação. O asfalto de rodagens tem suas propriedades modificadas com a exposição ao Sol e a impregnação por solo e óleo, tornando-se quebradiço, esbranquiçado e manchado. O amianto e a cerâmica de argila sofrem a proliferação de limo e a deposição de fuligem e de matéria vegetal. Muitas dessas variações são identificáveis em espectros de imagens do HSS, conforme apresentado na **Figura 5**.

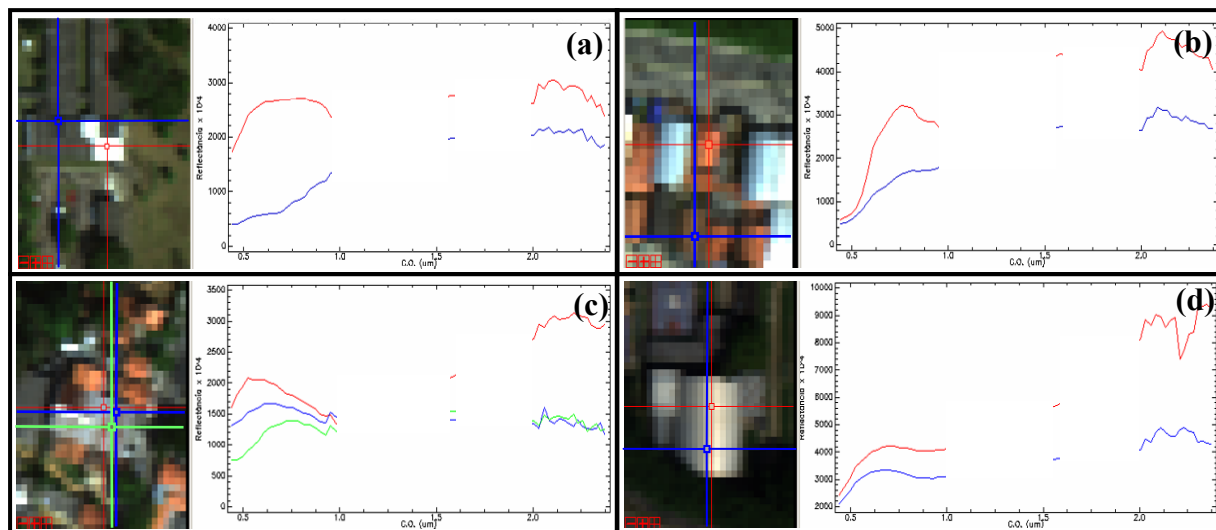


Figura 5 – Espectros de reflectância (valor multiplicado por 10^4) de alvos artificiais comuns a áreas urbanas. Telhado de fibrocimento novo e envelhecido (a); telhado de cerâmica de argila nova e envelhecida (b); telhado de aço galvanizado em três estágios de oxidação (c); e telhado de alumínio envelhecido (d). Escalas e valores do eixo vertical foram ajustados para melhor visualização dos espectros de cada tipo de alvo.

A boa resolução espacial da imagem utilizada também possibilitou caracterizar o espectro de alvos menores, como o caso de toldos de lonas plásticas, utilizados na proteção de acessos, garagens, portas e janelas de edificações. Esses e outros alvos confeccionados em PVC apresentam alta reflectância no IVP e feições de absorção características em 2150 nm e, principalmente, em 2325 nm, o que os torna relativamente fáceis de distinguir, desde que

predominem na área do pixel, ou seja, que não estejam fortemente misturados com o substrato sobre o qual se encontram. Espectros de lonas de PVC obtidos na imagem HSS são apresentados na **Figura 6**.

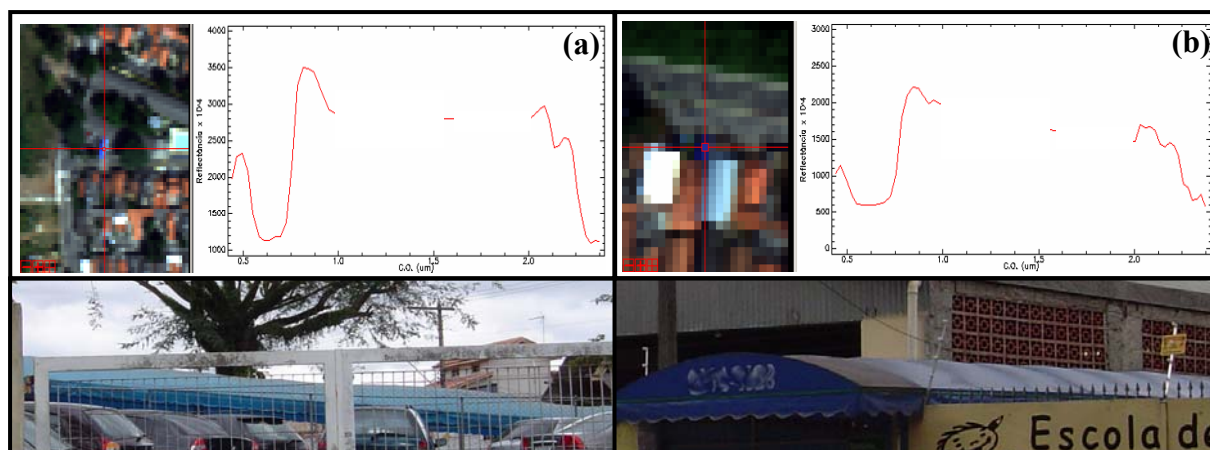


Figura 6 – Espectros de reflectância (valor multiplicado por 10^4) de dois toldos de PVC. Abaixo de cada espectro é apresentada a fotografia do alvo a que se refere.

Outras variedades de lonas de PVC identificadas na imagem apresentaram as mesmas características de absorção no SWIR, principalmente quanto à feição de 2325 nm. As diferenças na pigmentação das lonas contribuem, basicamente, para variações espectrais no VNIR, principalmente entre 400 e 850 nm, conforme apresentado na **Figura 7**. Os mesmos resultados foram verificados em medições espectrais de laboratório, nas quais foram observadas as mesmas magnitudes de absorção no SWIR, independentemente da pigmentação da amostra da lona.

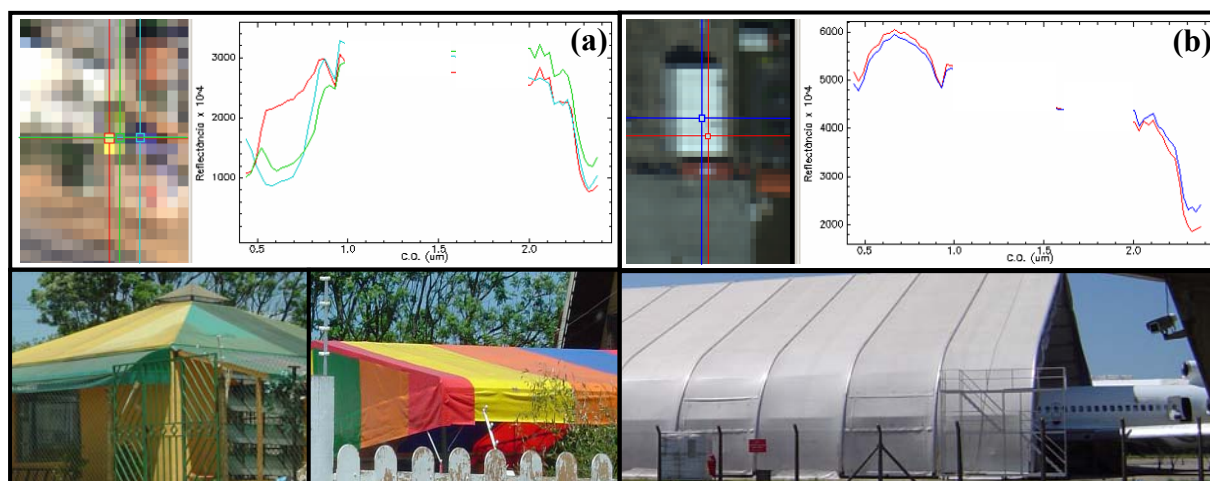


Figura 7 – Espectros de variedades de lonas de PVC com diferentes colorações apresentam feições similares de absorção em 2150 e 2325 nm, apesar das variações na região do VNIR. Vê-se, em (a), um hangar de lona branca e, em (b), dois modelos de quiosques coloridos.

4 Considerações Finais

Os resultados mostraram que o sensor HSS foi capaz de reproduzir adequadamente as principais feições espectrais de vegetação, solo e corpos d'água com diferentes composições. Feições de absorção atribuídas a minerais de argila e a óxidos de ferro puderam ser nitidamente identificadas em área de solo exposto, bem como nos telhados de cerâmica

avermelhada. Em espectros de corpos d'água, feições devidas à presença de sedimentos inorgânicos e de fitoplânctons também foram identificadas. Espectros de superfícies metálicas de alumínio e de aço galvanizado indicaram que estes materiais podem ser espectralmente diferenciados nas imagens. O mesmo ocorre com materiais utilizados em coberturas menores, como toldos em PVC (Cloro de polivinilo), utilizados na confecção de tendas e de proteções de janelas, portas, acesso de edificações e estacionamentos, que apresentam bandas de absorção em 2150 nm e 2325 nm nos espectros dos pixels.

Deve-se observar, entretanto, que há a forte suscetibilidade dos resultados espectrais aos parâmetros utilizados na correção e aos modelos de atmosfera e aerossóis. Além desses aspectos, verificou-se que a obtenção de correções adequadas para uma região da imagem não garantem a mesma qualidade em toda a cena, principalmente em virtude da variabilidade do vapor d'água e da concentração de CO₂. Por esses aspectos, quanto menor a área a ser corrigida e mais específicos os parâmetros, melhor as chances de boas correções.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração do EMAER, CTA, GEEv, IEAv, INPE, COMGAR, e FAE III que disponibilizaram recursos, instalações, equipamentos, dados e/ou meios para a realização desse trabalho. Agradecimento particular é destinado ao 1º/6ºGAv, que participou diretamente da aquisição das imagens.

Referências

- Castro, R.M.; Moreira, R.C.; Esposito, E.S.C.; Lucca, E.V.D. Avaliação do ruído em sensores eletroópticos: abordagem da imagem escura no HSS. In.: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 12., Goiânia, 2005. **Anais**. Epiphany, J.C.N.[et al.]. São José dos Campos: INPE, p. 355-362. 2004.
- Herold, M.; Roberts, D.A.; Gardner, M.E.; Dennison, P.E. Spectrometry for urban area remote sensing – development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 304-319, 2004.
- Liang, S. **Quantitative remote sensing of land surfaces**. New Jersey: J. Wiley, 2004. 560 p.
- Moreira, R.C.; Castro, R.M.; Esposito, E.S.C.; Lucca, E.V.D. Sensor hiperespectral HSS: sumário das características técnicas. In.: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 12., Goiânia, 2005. **Anais**. Epiphany, J.C.N.[et al.]. São José dos Campos: INPE, p. 4517-4524. 2004.
- Research Systems, Inc. **FLAASH User's Guide: ENVI FLAASH Version 4.1**. Boulder: RSI, 2004. 80 p.
- Souza Filho, C.R. Sensores hiperespectrais a bordo do SIVAM. **Revista InfoGEO**, ed. 34, p. 32-34, Jul/Ago, 2004.
- Ungar, S.G.; Pearlman, J.S.; Mendenhall, J.A., Reuter, D. Overview of the Earth Observing One (EO-1) Mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1149-1159, 2003.