

Simulação das bandas espectrais das câmaras CCD e WFI (CBERS), geradas a partir das imagens do sensor hiperespectral AVIRIS

ENIO SALVATORE CARMINE ESPOSITO¹

THELMA KRUG²

ROBERT OTIS GREEN³

¹CTA - Centro Técnico Aeroespacial
Caixa Postal 6044, 12228-840 São José dos Campos, SP, Brasil
enio@ieav.cta.br

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

³JPL – Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena (CA) 91109
rog@gomez.jpl.nasa.gov

ABSTRACT

This study aims at presenting a set of simulated images from the sensors aboard the China-**BRAZIL** Earth Resources Satellite – CBERS. Data from the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer AVIRIS were used to conduct the simulations. The spectral response functions (SRF) of the satellite cameras are transformed by means of a spline interpolator, to identify the locations of the corresponding AVIRIS channels in the SRF of each band of the simulated sensor. A transformation of the interpolated SRF allows the identification of the relative contribution (weight) of each AVIRIS channel in the constitution of the CBERS bands. Two factors are also taken into account: (1) the atmospheric transmittance from 20 km (AVIRIS flight altitude) to 778 km (CBERS altitude), (2) the correction of the zenithal solar angle for the CBERS acquisition time.

Keywords: Sensor simulation; CBERS; AVIRIS.

1. INTRODUÇÃO

Em setembro deste ano, o Brasil e a China estarão lançando em órbita o primeiro satélite do Programa denominado *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS). O objetivo deste trabalho é simular a resolução espectral das imagens geradas pela câmara CCD de alta resolução (CCD) e pela câmara de largo campo de visada (WFI), usando as imagens do espectrômetro imageador aerotransportado *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL). O AVIRIS adquiriu imagens de várias áreas das regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil em meados de 1995, durante o experimento *Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation – Brazil* (SCAR-B).

O que motivou a realização desse estudo foi a possibilidade de avaliar previamente as potencialidades de utilização das imagens do satélite, através de um método de simulação baseado nas funções de resposta espectral, que caracterizam as bandas espectrais das câmaras do CBERS. O método apresentado aqui, desenvolvido no JPL por Green e Shimada (1997), foi utilizado na calibração pós-lançamento do sensor *Optical Sensor* (OPS) do satélite *Japanese*

Earth-Resources Satellite (JERS-1). Na ocasião, realizou-se um sobrevôo simultâneo (AVIRIS e OPS) em uma área teste. Os dados AVIRIS foram transformados em imagens OPS por uma convolução espectral e espacialmente registrados à imagem obtida pelo OPS, para a obtenção de coeficientes de calibração radiométrica (Green e Shimada, 1997).

2. SISTEMAS SENSORES DO CBERS

O satélite CBERS foi projetado para cobertura global e contém três câmaras para observação óptica e um sistema de coleta de dados ambientais. Uma característica do CBERS é a diversidade de instrumentos sensores com diferentes resoluções espaciais e frequência de coleta de dados. A **Tabela 1** fornece um resumo dos parâmetros dos sensores a bordo do satélite. Uma breve descrição dos sistemas sensores é apresentada a seguir:

O **Imageador de Largo Campo de Visada (WFI)** cobrirá uma faixa de 890 km de largura fornecendo uma visão sinóptica da superfície com resolução de 260 m. Será capaz de cobrir o globo terrestre em 5 dias, em duas bandas espectrais centradas em 0,66 μ m (banda 10) e 0,83 μ m (banda 11) que correspondem ao vermelho (R) e infravermelho-próximo (NIR), respectivamente.

Já a **Câmara CCD** de alta resolução, fornecerá imagens de uma faixa de 113 km de largura, com resolução de 20m. Esta câmara terá a capacidade de orientar lateralmente seu campo de visada dentro de ± 32 graus, possibilitando a aquisição de imagens estereoscópicas de uma certa região. Além disso, qualquer fenômeno detectado pela WFI poderá ser localizado pela câmara CCD através do apontamento apropriado de seu campo de visada, dentro de no máximo 3 dias. A câmara CCD operará em 5 bandas espectrais, incluindo uma banda pancromática (PAN) de 0,51 a 0,73 μ m (banda 5). O posicionamento espectral das bandas 3 e 4 da câmara CCD é similar ao das bandas 10 e 11 da câmara WFI, a fim de possibilitar a combinação dos dados adquiridos por ambas. As bandas 1 e 2 cobrem as faixas espectrais de 0,45 a 0,52 μ m e de 0,52 a 0,59 μ m, respectivamente. Serão necessários 26 dias para a cobertura da superfície terrestre com esta câmara.

TABELA 1 - Resumo das características dos sensores levados a bordo do CBERS

| CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SENSORES LEVADOS A BORDO DO CBERS | | | |
|--|--|---|--|
| CÂMARAS => | CCD | IR-MSS | WFI |
| RESOLUÇÃO ESPACIAL | 20 m | 80 m (PAN) 80 m (SWIR) 160 m (TIR) | 260 m |
| CAMPO DE VISADA | 8,3 ⁰ | 8,8 ⁰ | 60 ⁰ |
| LARGURA DA FAIXA IMAGEADA | 113 km | 120 km | 890 km |
| RESOLUÇÃO TEMPORAL | 26 dias nadir 3 dias off-nadir com visada oblíqua de $\pm 32^\circ$ | 26 dias | 5 dias |
| FAIXAS ESPECTRAIS (μm) | 1) 0,45 - 0,52 (B) 2) 0,52 - 0,59 (G) 3) 0,63 - 0,69 (R) 4) 0,77 - 0,89 (NIR) 5) 0,51 - 0,73 (PAN) | 6) 0,50-1,10 (PAN) 7) 1,55-1,75 (SWIR) 8) 2,08-2,35 (SWIR) 9) 10,40 - 12,5 (TIR) | 10) 0,63-0,69 (R) 11) 0,77 - 0,89 (NIR) |

FONTE: INPE (1995), p. 13.

Por último, existe a **Câmara de Varredura no Infravermelho (IR-MSS)** que operará em 4 bandas espectrais, sendo uma pancromática (PAN), duas posicionadas no infravermelho médio (SWIR) e uma localizada no infravermelho termal (TIR). O IR-MSS produzirá imagens de uma faixa no terreno de 120 km de largura, com resolução espacial de 80 m (PAN e SWIR) e 160 m (TIR). Sua resolução temporal será de 26 dias. As funções de resposta espectral desta câmara não foram disponibilizadas pela Academia de Tecnologia Espacial da China (CAST), o que impediu a simulação de suas imagens.

3. O SENSOR AVIRIS

O *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) desenvolvido pela NASA/JPL, entrou em operação em 1987 para ser o primeiro sistema imageador a adquirir dados em 224 bandas espectrais contíguas e estreitas de aproximadamente 10 nm de largura, ao longo da porção refletida do espectro eletromagnético, no intervalo de 0,4 μm a 2,5 μm (Vane et al., 1984). O AVIRIS é operado a partir das aeronaves ER-2 da NASA, que voam a uma altitude de 20 km.

As imagens do AVIRIS são formadas a partir de dois movimentos: o primeiro é referente ao deslocamento da aeronave a 20 km de altitude, que define a extensão da imagem. O segundo é referente à varredura mecânica, definida por uma linha de imageamento com 614 pixels de largura, que corresponde a uma faixa no terreno com 10,5 km de extensão, perpendicularmente à direção de vôo. O campo de visada instantâneo (IFOV) é de 1 mrad, que fornece um pixel de 20m. As linhas de vôo são normalmente de 100 km de extensão. O gravador a bordo do ER-2 é capaz de armazenar cerca de 1000 km de linhas de vôo.

4. MÉTODO DE SIMULAÇÃO DAS IMAGENS DO CBERS

4.1 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO

A **Figura 1** apresenta o fluxograma do algoritmo de simulação utilizado neste estudo. O número entre parênteses acima de cada bloco indica a seção onde são detalhadas cada fase da simulação.

4.2 - FUNÇÃO DE RESPOSTA ESPECTRAL DOS FILTROS DAS CÂMARAS CCD E WFI

Para simular as imagens dos sensores do CBERS, as bandas espectrais do AVIRIS passam por um processo de convolução que resulta nas bandas dos sensores a bordo do satélite. As funções de resposta espectral dos filtros das câmaras, determinadas em laboratório, são um dado básico para o início deste processo, pois determinam como e quanto cada comprimento de onda contribui para a banda espectral do CBERS. A **Figura 2** mostra as funções de resposta espectral medidas dos filtros da câmara CCD. As bandas espectrais numeradas de B1 a B5 referem-se aos canais azul, verde, vermelho, infravermelho-próximo e pancromático, respectivamente.

A **Figura 3** mostra as funções de resposta espectral medidas dos filtros da câmara WFI. As bandas espectrais B10 e B11 referem-se aos canais do vermelho e infravermelho-próximo, respectivamente. Os símbolos que aparecem nas curvas indicam os comprimentos de onda cujas medidas foram adquiridas em laboratório.

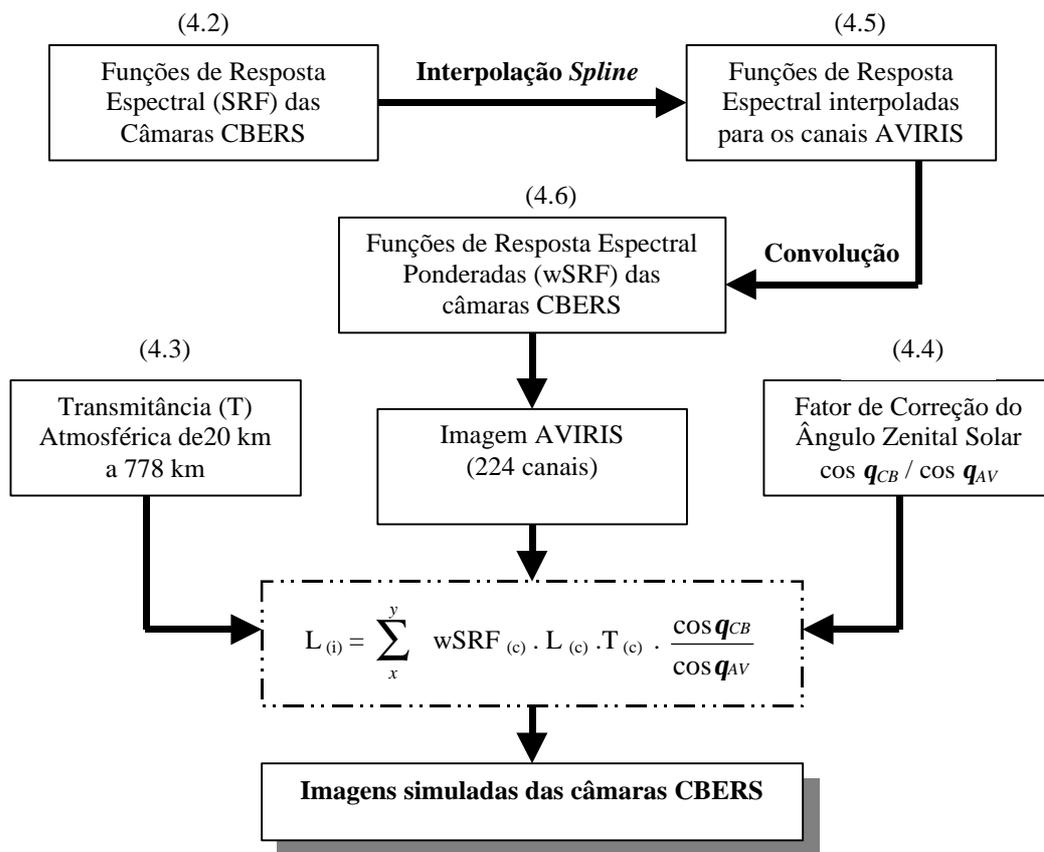


Fig. 1 – Fluxograma do algoritmo de simulação das imagens das câmaras CCD e WFI - CBERS.

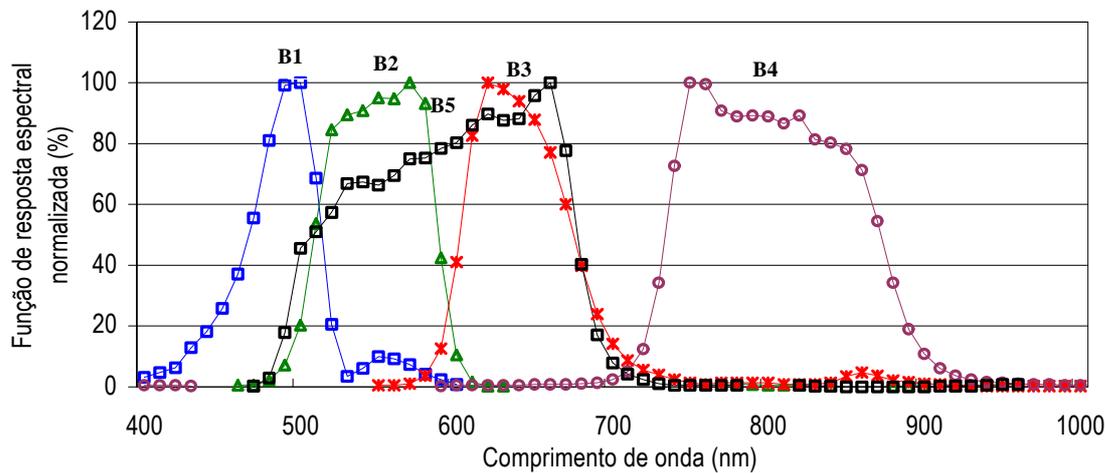


Fig. 2 – Curvas normalizadas da resposta espectral da câmara CCD.
 FONTE: adaptada de CAST (1997), p. 19–21

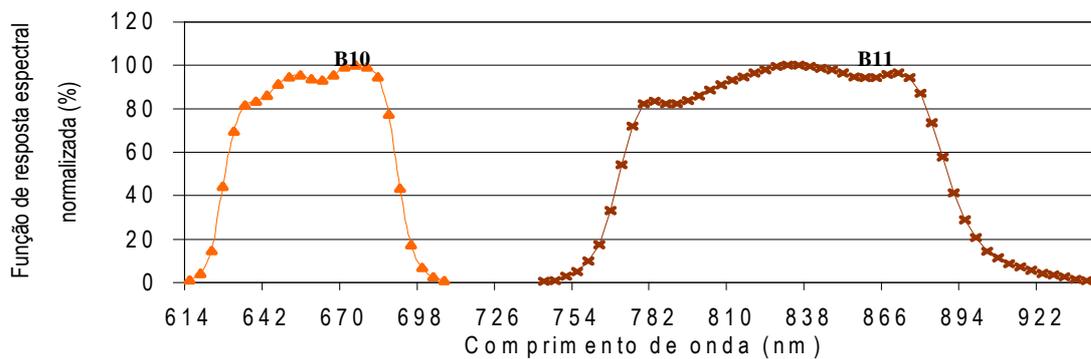


Fig. 3 – Curvas normalizadas da resposta espectral da câmara WFI.
 FONTE: adaptada de Santana (1997).

4.3 TRANSMITÂNCIA DA ATMOSFERA

Para realizar a simulação das imagens CBERS, fez-se necessário extrapolar a radiância espectral medida pelo AVIRIS a 20 km de altitude, para a altitude da órbita do CBERS, a 778 km. A influência dessa espessura da atmosfera foi calculada a partir do valor da transmitância que, multiplicada à imagem AVIRIS, permitiu extrapolar a radiância medida pelo AVIRIS para o ambiente da órbita CBERS. O programa MODTRAN 3.0 foi utilizado para esse cálculo, fornecendo os valores de transmitância em cada comprimento de onda. A **Figura 4** apresenta o resultado da transmitância atmosférica, onde verifica-se que os valores se aproximam da unidade, à exceção de fracas absorções devido ao ozônio, oxigênio e dióxido de carbono, em porções restritas do espectro.

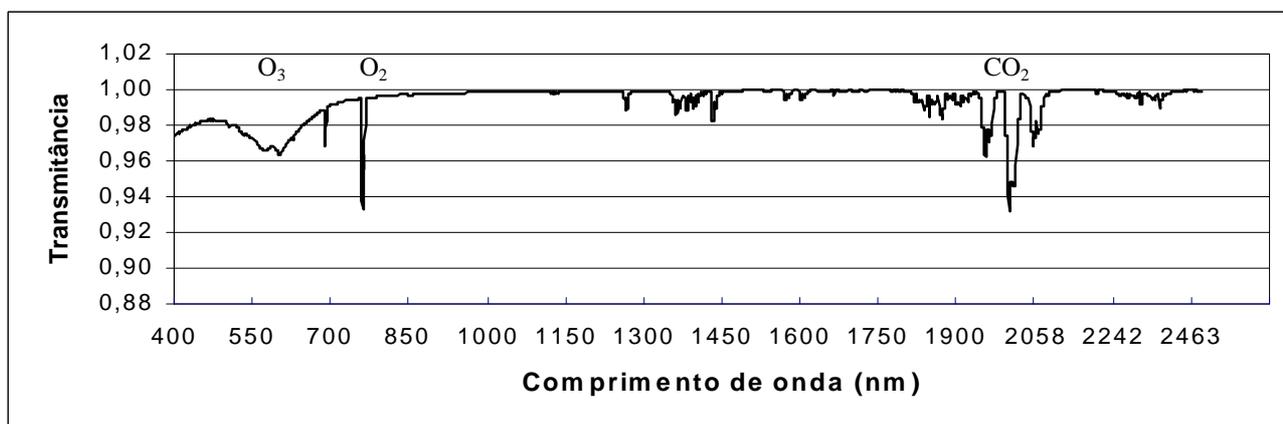


Fig 4 – Transmitância da atmosfera no perfil de 20 km a 778 km.

4.4 - CORREÇÃO DO ÂNGULO ZENITAL SOLAR

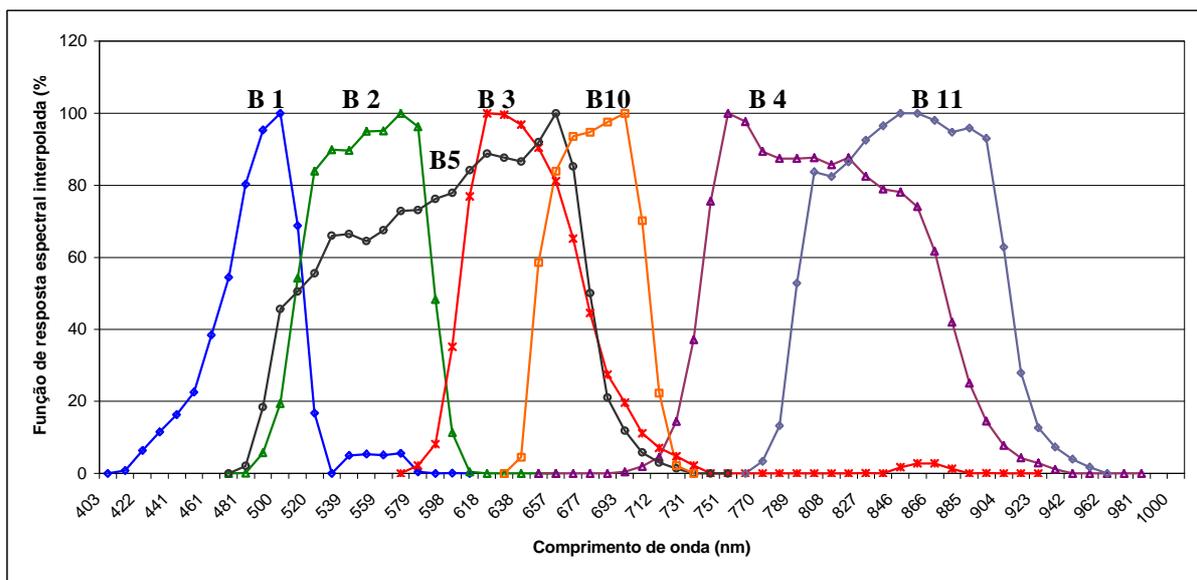
O satélite CBERS está programado para passar sobre o equador às 10:30 h, horário local. Entretanto, as imagens AVIRIS foram coletadas em horários diferenciados. O ER-2 decolava entre 13:30 e 16:30 GMT para vôos de 4 a 8 horas de duração. Durante a aquisição das imagens, o AVIRIS armazenava informações sobre o horário e a posição geográfica, possibilitando, desta

forma, conhecer as condições de iluminação da cena. Com isso, calculou-se o ângulo zenital solar tanto para o horário de passagem do AVIRIS como para o horário de passagem do satélite, obtendo-se um fator de correção que foi aplicado em toda a cena. Este fator, dado pela expressão $\frac{\cos q_{CB}}{\cos q_{AV}}$, possibilitou corrigir a imagem em termos de irradiância global da cena, mantendo inalterada a relação de aspecto dos alvos (efeito de sombreamento).

4.5 - INTERPOLAÇÃO DAS FUNÇÕES DE RESPOSTA ESPECTRAL DAS CÂMARAS CBERS PARA OS CANAIS CORRESPONDENTES DO SENSOR AVIRIS

As funções de resposta espectral medidas em laboratório das câmaras CCD e WFI (Figuras 2 e 3) foram transformadas a partir de um algoritmo de interpolação *spline*. Esse algoritmo identifica, nas curvas de banda larga da CCD e WFI (Figuras 2 e 3), o valor central de cada banda estreita do AVIRIS. Isto permite a construção de novas curvas com perfis semelhantes para os canais do AVIRIS (Figura 5). As bandas numeradas de B1 a B5 referem-se aos canais azul, verde, vermelho, infravermelho-próximo e pancromático da câmara CCD e as bandas numeradas B10 e B11 referem-se aos canais vermelho e infravermelho-próximo da câmara WFI

Fig. 5 – Funções de resposta espectral das bandas CCD e WFI interpoladas, correspondentes às



posições dos canais espectrais do AVIRIS.

4.6 VETORES PARA CONVOLUÇÃO ESPECTRAL

Uma vez obtidas as funções interpoladas para os canais do AVIRIS, aplicou-se um algoritmo de convolução para gerar as funções de resposta espectral ponderadas (wSRF). Esta convolução foi processada entre as funções de resposta interpoladas e as bandas dos canais AVIRIS, que são consideradas funções gaussianas com larguras de banda aproximadas de 10 nm. Como resultado, foram obtidos valores que representam o peso de cada canal na resposta espectral ou seja, o

quanto, em termos relativos, aquele canal contribuiu para a formação da banda da câmara CBERS simulada (**Figura 6**). Essas funções de resposta espectral ponderadas são aplicadas ao espectro medido pelo AVIRIS, produzindo as bandas espectrais das câmaras do satélite CBERS.

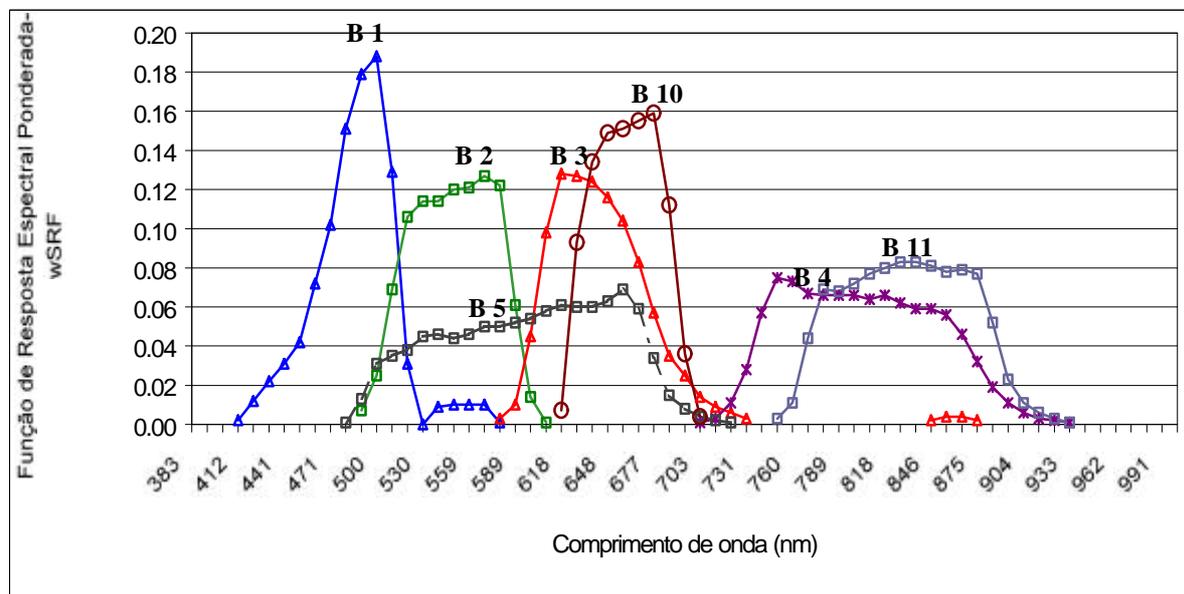


Fig.6 – Funções de resposta espectral ponderadas das câmaras CCD e WFI, correspondentes às posições dos canais espectrais do AVIRIS.

Generalizando, considere a banda larga (i) da câmara CCD ou WFI, construída a partir de n bandas estreitas do AVIRIS que variam de x a y, onde x e y são as bandas do primeiro e último canais, respectivamente, que contribuem para a banda (i) da câmara CBERS.

A radiância da imagem simulada ($L_{(i)}$) é formada pela soma do produto da função de resposta espectral ponderada ($wSRF_{(c)}$) e a radiância do AVIRIS ($L_{(c)}$) para cada canal AVIRIS que participa na formação da imagem. Assim:

$$L_{(i)} = \sum_x^y wSRF_{(c)} \cdot L_{(c)}. \quad (1)$$

Essa operação é feita pixel a pixel. É importante salientar que a transmitância atmosférica e o fator de correção do ângulo zenital solar, são variáveis multiplicativas na simulação, conforme apresentado na expressão da **Figura 1**.

5. IMAGENS SIMULADAS

As imagens simuladas de cada área teste são apresentadas de uma forma padronizada, de modo a facilitar a sua visualização e interpretação. Em uma mesma página, são apresentadas, individualmente, as cinco bandas da câmara CCD e uma composição colorida associando a banda infravermelho-próximo (4) ao canal vermelho; a banda vermelho (3) ao canal verde e a banda verde (2) ao canal azul. Nas simulações da câmara WFI, são mostradas individualmente as

bandas vermelho (10), infravermelho próximo (11) e uma razão simples entre as bandas 11 e 10. Esta imagem razão entre bandas possibilita fazer composições coloridas variando-se as posições das bandas entre os canais vermelho, verde e azul.

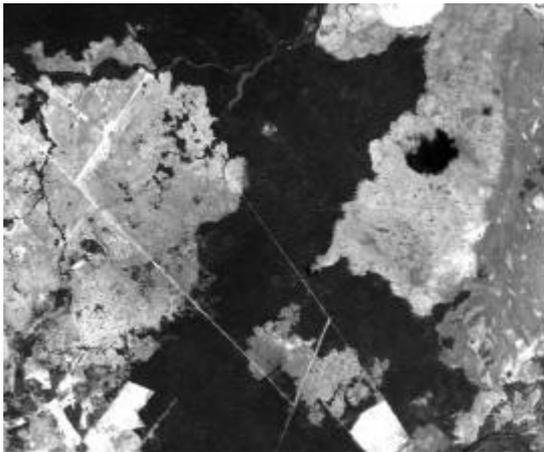
As simulações foram feitas a partir de imagens de áreas urbanas (parte da cidade de Cuiabá), florestadas (área próxima a Porto Nacional), alagadas (Pantanal Mato-grossense), cultivadas (área ao norte de Brasília) e queimadas (mesma área da imagem de Cuiabá, com dois focos de incêndio próximos à zona urbana), de maneira a possibilitar a avaliação das potencialidades das câmaras CCD e WFI. Apenas as imagens de Porto Nacional e Cuiabá são apresentadas, a título de exemplo, haja vista a limitação de páginas deste trabalho.

5.1 - PORTO NACIONAL

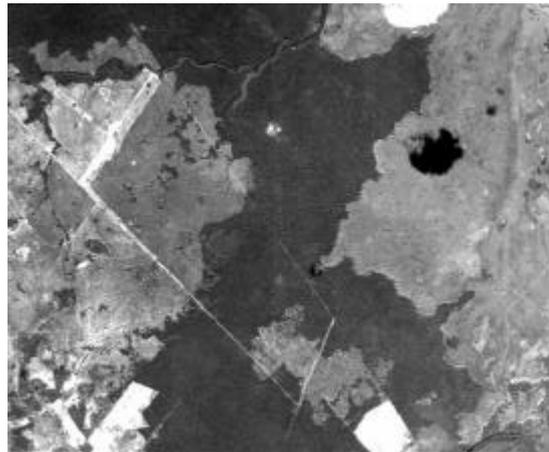
A composição colorida da câmara CCD (**Figura 7**) mostra, em vermelho, as áreas que correspondem a vegetação densa (possivelmente cerradão), caracterizada por um valor de radiância elevado no canal IR e baixo nos canais do espectro visível. As áreas em azul, na lateral direita da cena, representam áreas de pastagem mais baixas e mais úmidas, enquanto as demais áreas esverdeadas indicam pastagens mais secas, com diferentes graus de uso devido ao desgaste provocado pelo gado. A área em branco na margem inferior da cena, corresponde a um desmatamento recente. A **Figura 8** mostra a simulação da WFI para a mesma cena.

5.2 - CCD - CUIABÁ - 25 DE AGOSTO DE 1995

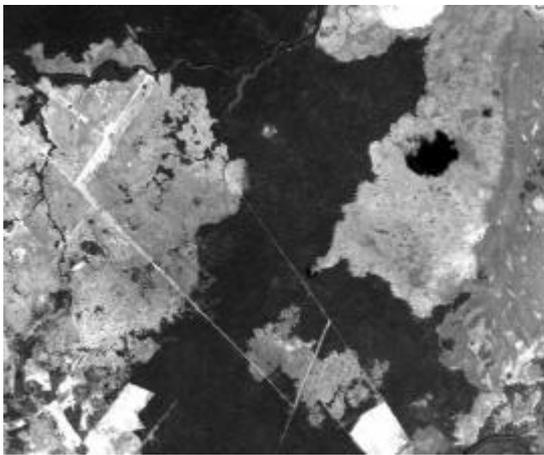
A **Figura 9** mostra a capacidade de penetração das diferentes bandas espectrais da CCD em função do aumento do comprimento de onda. Nas bandas azul e verde, a fumaça ocasionada por uma queimada impede qualquer observação do terreno. Nas bandas vermelho e principalmente infravermelho próximo, a influência da presença dessa fumaça é gradualmente minimizada. A imagem composição mostra claramente que a interferência na imagem é ocasionada por uma nuvem de fumaça, o que não é possível concluir apenas pela análise de uma única banda.



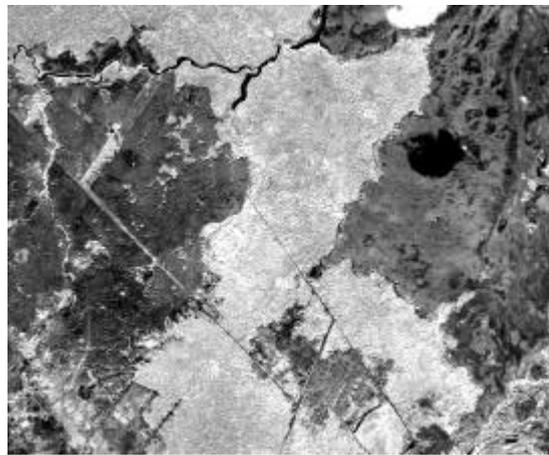
Banda B-CCD (450 a 520 nm)



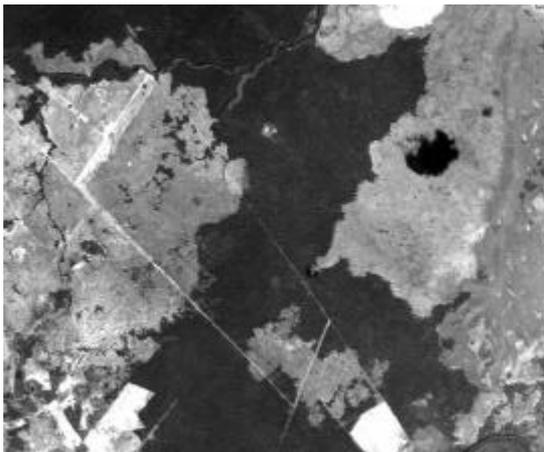
Banda G-CCD (520 a 590 nm)



Banda R-CCD (630 a 690 nm)



Banda IR-CCD (770 a 890 nm)

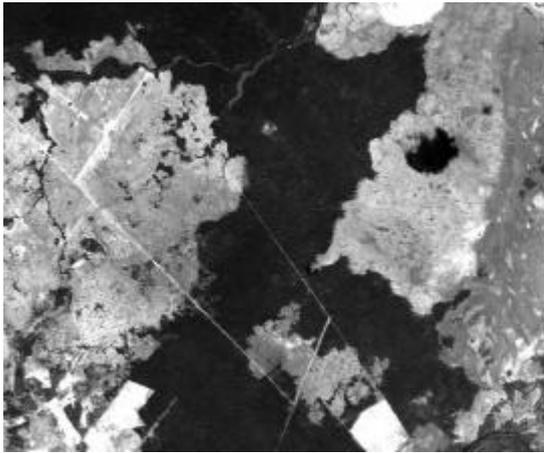


Banda PAN-CCD (510 a 730 nm)

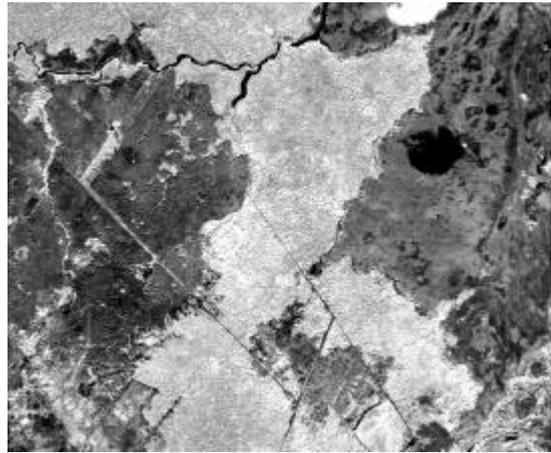


Composição IR/R/G - CCD

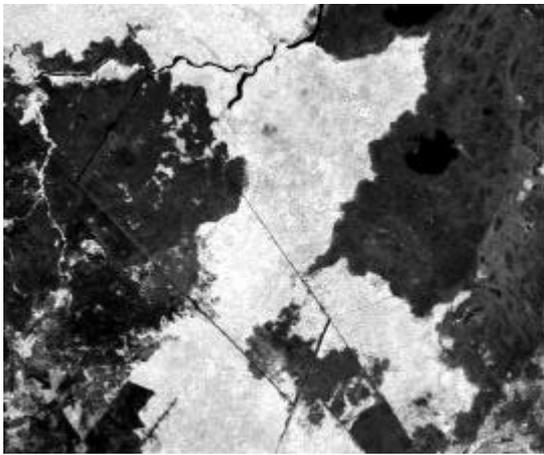
Fig.7 - Imagem simulada da câmara CCD. Área Porto Nacional Latitude: $11^{\circ}12'S$
Longitude: $049^{\circ}50'W$. Dia: 20 de Agosto de 1995.



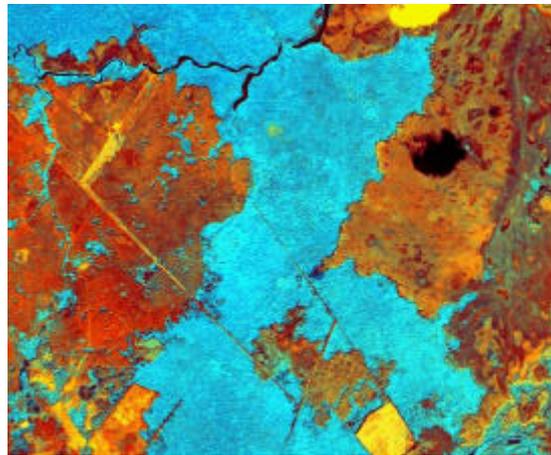
Banda R-WFI (630 a 690 nm)



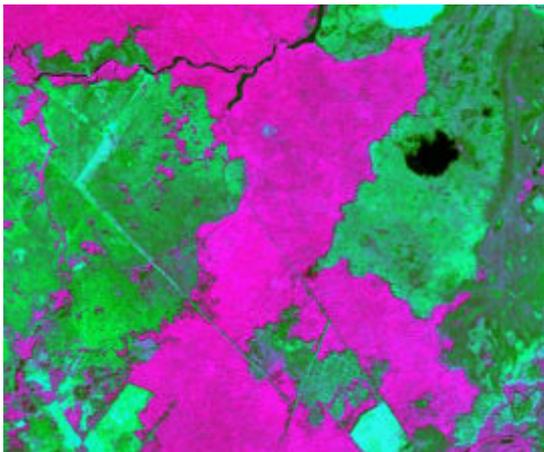
Banda IR-WFI (770 a 890 nm)



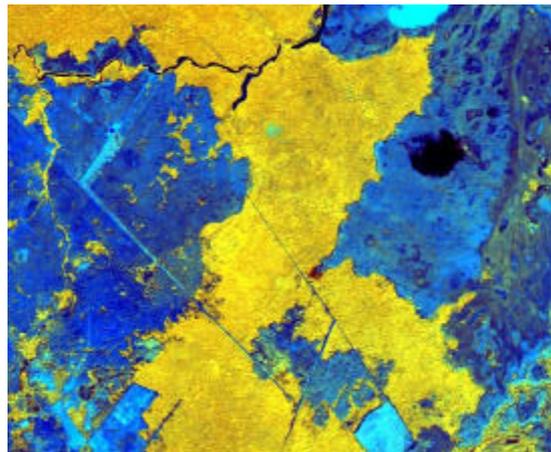
Banda Razão IR:R



Composição: R / IR / Razão IR:R-WFI

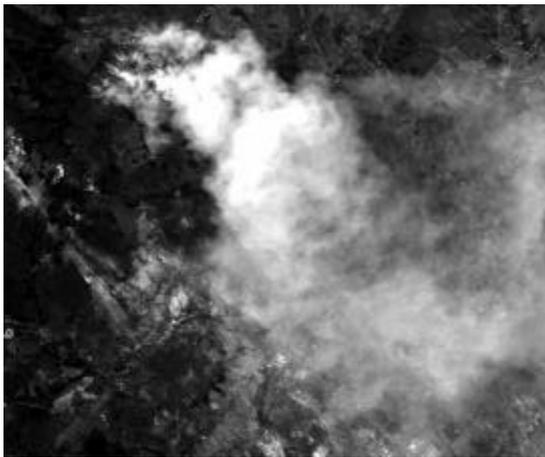


Composição: Razão IR:R / R / IR-WFI

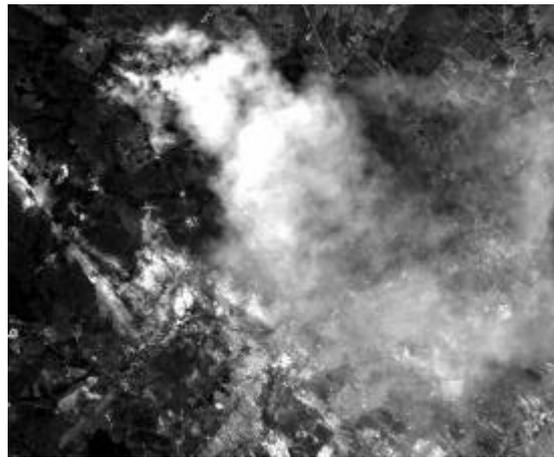


Composição: Razão IR:R / IR / R -WFI

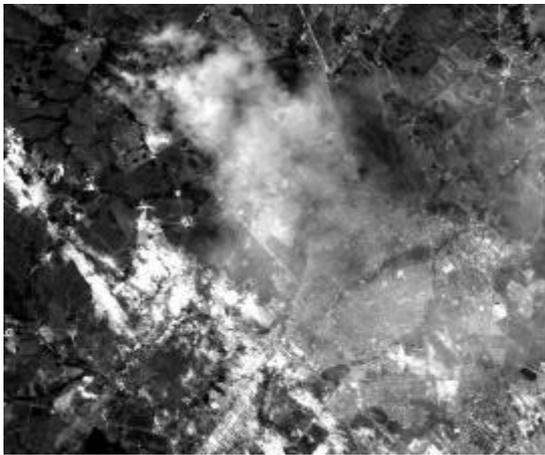
Fig.8- Imagem simulada da câmara WFI. Área Porto Nacional - Latitude: $11^{\circ}12'S$
Longitude: $049^{\circ}50'W$. Dia: 20 de Agosto de 1995.



Banda B-CCD (450 a 520 nm)



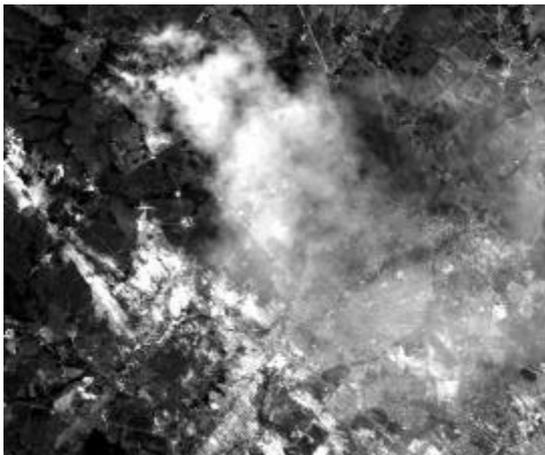
Banda G-CCD (520 a 590 nm)



Banda R-CCD (630 a 690 nm)



Banda IR-CCD (770 a 890 nm)



Banda PAN-CCD (510 a 730 nm)



Composição IR/R/G - CCD

Fig. 9 - Imagem simulada da câmara CCD. Área Cuiabá Latitude: $15^{\circ}33'S$
Longitude: $056^{\circ}30'W$. Dia: 25 de Agosto de 1995.

6. CONCLUSÃO

A simulação de sensores imageadores multiespectrais a partir de sensores hiperespectrais, possibilita ao pesquisador avaliar as suas potencialidades e verificar se os resultados alcançados atendem aos objetivos propostos. Além disso, cria a oportunidade de se experimentar variações nos intervalos espectrais originais, a fim de proceder ajustes nas bandas espectrais para atingir melhores resultados na discriminação das feições de interesse.

Os sensores hiperespectrais da classe do AVIRIS possibilitam realizar estudos de futuros sensores imageadores multiespectrais. Para tanto, é fundamental reunir dados de campo controlados a partir de áreas de teste definidas de acordo com as aplicações que se espera desse sensor. A integração de imagens hiperespectrais do AVIRIS com dados coletados no campo em áreas pré-definidas feita por pesquisadores de várias áreas que utilizam sensoriamento remoto será muito útil na definição de bandas espectrais desses sensores.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chinese Academy of Space and Technology (CAST) CBERS CCD camera subsystem. Critical design review data package. CBH-REV-002, 1997, 29 p..

Green, R. O.; Shimada, M. On-orbit calibration of a multi-spectral satellite sensor using a high altitude airborne imaging spectrometer. **Adv. Space Res.** 19 (9) p. 1387-1398, 1997.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Um tributo Sino-Brasileiro aos recursos naturais de nosso planeta. São José dos Campos, abr. 1995. 18 p..

Santana, C. E. Comunicação pessoal, 1997.

Vane, G. et al. Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS): an advanced tool for earth remote sensing. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, SP215, IEEE, New York, 1984a, **Proceedings** p. 751-757.