

Revista Brasileira de Cartografia (2012) N<sup>o</sup> 64/4: 487-502  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## CONVERSÃO DOS NÚMEROS DIGITAIS DE IMAGENS TIR DO SENSOR HSS PARA RADIANCIA E ESTIMATIVA DA TEMPERATURA E EMISSIVIDADE

*Conversion of Digital Numbers of the HSS Sensor TIR Images into Radiance and  
Temperature and Emissivity estimation*

**Leidiane do Livramento Andrade<sup>1,2</sup>, Lênio Soares Galvão<sup>2</sup>  
& Ruy Morgado de Castro<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados - IEAv/DCTA**

Caixa Postal 6044 – 12.228-970 – São José dos Campos - SP, Brasil  
{leidiane.andrade; rmcastro}@ieav.cta.br

**<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{leidiane; lenio}@dsr.inpe.br

*Recebido em 30 de Novembro, 2011/ Aceito em 15 de Março, 2012  
Received on November 30, 2011/ Accepted on March 15, 2012*

### RESUMO

O sensoriamento remoto termal tem sido utilizado em diversos estudos urbanos pela possibilidade de espacialização de dados de temperatura e de emissividade e de sua associação com o uso do espaço urbano. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia de conversão de Números Digitais (ND's) de imagens do infravermelho termal (TIR) do sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*) em grandeza física (radiância). Além disto, foi feita a correção atmosférica da imagem em radiância usando o modelo de correção MODTRAN, visando estimar a temperatura da superfície e a emissividade espectral relativa com três métodos: Canal de Referência (REF), Normalização da Emissividade (NOR) e Emissividade *ALPHA*. Os resultados destes métodos foram comparados entre si, mostrando que a emissividade espectral dos principais materiais presentes na área de estudo foi consistente. Já para as temperaturas termodinâmicas destes mesmos materiais, determinadas com os métodos NOR e REF, verificou-se que houve diferença nos valores calculados de 1,2°C a mais para o REF, para todos os materiais estudados.

**Palavras chaves:** Imagem TIR, temperatura, emissividade, área urbana, correção atmosférica.

### ABSTRACT

The thermal remote sensing has been applied in many urban studies due to the possibility of estimating temperature and emissivity data on a per-pixel basis and of associating these data with the use of urban space. The objective here was to propose a methodology to convert Digital Numbers (DN's) of the HSS (*Hyperspectral Scanner System*) sensor Thermal Infrared (TIR) images into radiance values. Furthermore, the resultant radiance images were corrected for the atmospheric effects using the MODTRAN atmospheric correction code before estimating the surface temperature and the relative spectral emissivity using three methods: the Reference Channel (REF), the Emissivity Normalization (NOR) and the ALPHA Emissivity. The results of these methods were compared to each other showing that the emissivity of the main

materials of the study area was consistent. However, for the temperature analysis, the same materials presented a difference of 1.2°C, which was higher for REF than NOR.

**Keywords:** IR image, temperature, emissivity, urban area, atmospheric correction.

## 1. INTRODUÇÃO

Visando ampliar as possibilidades de aplicação prática dos dados de sensoriamento remoto, sensores multiespectrais que operam no infravermelho termal (TIR), com melhores resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica, vêm sendo desenvolvidos. Em nível orbital, pode-se citar o sensor orbital multiespectral *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo da plataforma Terra, que obtém imagens em cinco bandas no TIR com resolução espacial de 90 m. Operando em aeronaves, há uma variedade de sensores que obtêm dados em várias bandas no TIR com resolução espacial variável de acordo com a altitude de voo. Exemplos incluem o *Digital Airborne Imaging Spectrometer* (DAIS), o *Multispectral Infrared Visible Image Spectrometer* (MIVIS) e o *Airborne Hyperspectral Scanner* (AHS) (HOOK *et al.*, 2001).

O sensoriamento remoto termal tem sido amplamente utilizado em estudos urbanos para: (a) entender a relação entre a temperatura da superfície e os materiais naturais e artificiais presentes em áreas urbanizadas (WENG *et al.*, 2004; LU; WENG, 2006); (b) comparar a reflectância e a temperatura de superfície (SMALL, 2006); (c) monitorar e delimitar ilhas de calor urbana (WENG *et al.*, 2004; ANDRADE *et al.*, 2007); e (d) identificar técnicas para a extração de parâmetros termais da superfície (KEALY; HOOK, 1993; LI *et al.*, 1999; SOBRINO *et al.*, 2002; JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2005), entre outros.

No Brasil, o *Hyperspectral Scanner System* (HSS), utilizado no presente trabalho, opera com 37 bandas no espectro refletido e 13 no espectro emitido (MOREIRA *et al.*, 2005). Apesar de operar no TIR, a maioria dos trabalhos tem se concentrado no espectro refletido pela ausência de uma metodologia consistente para calibração radiométrica dos dados da região do termal, correção atmosférica e para determinação subsequente da emissividade e temperatura.

Especificamente, na região do termal, um dos desafios do uso de sensores como o HSS é a aplicação de metodologias visando à separação da

temperatura e emissividade (LI *et al.*, 1999; BOREL, 2008), uma vez que estas foram desenvolvidas para sensores remotos de baixa resolução espectral e espacial, ou sensores em nível orbital, o que exige critérios técnicos adequados na sua utilização (SOBRINO *et al.*, 2002; JIMÉNEZ *et al.*, 2007; JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2005; SOBRINO *et al.*, 2006). Isto ocorre porque as características do próprio sensor, a geometria de imageamento, as características da superfície de estudo e as propriedades da atmosfera no momento da medida (LEAVER; THOMAS, 2006) são fatores importantes para a estimativa mais precisa da emissividade e da temperatura. Quando se trata deste tipo de dado (alta resolução espacial e espectral), é preciso estudá-lo desde a sua geração, no momento do imageamento, até a extração final de informações referentes à área de estudo (JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2005).

Baseado no exposto acima, este trabalho tem como objetivo geral estimar a emissividade e a temperatura da superfície em uma área urbana de São José dos Campos (SP), por meio de métodos amplamente utilizados pela comunidade científica. A hipótese do trabalho é que é possível calibrar um conjunto de imagens do sensor HSS obtido no período noturno em 30 de maio de 2006, com resolução espacial de 2,9 m ao nadir, para estimar as variações da temperatura de superfície e da emissividade, utilizando as imagens noturnas das bandas do TIR.

De forma mais específica, o trabalho tem os seguintes objetivos: 1) Desenvolver uma metodologia de conversão de Números Digitais (ND) para valores de radiância e de correção atmosférica das imagens HSS TIR; 2) Comparar os métodos Normalização da Emissividade (NOR), Canal de Referência (REF) e Emissividade ALPHA para estimativa dos valores de temperatura e emissividade relativa dos principais componentes de cena.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sensor HSS

O sensor HSS é um sensor imageador aerotransportado não climatizado, abrangendo

diversas bandas não contíguas em regiões espectrais do visível e infravermelho próximo (VNIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e TIR, fabricado e comercializado pela SensyTech – *Imaging Group*, EUA, visando fornecer dados para diversos tipos de estudos ambientais (MOREIRA *et al.*, 2005). Possui 37 bandas (ou canais) na região do espectro refletido (0,44-2,4  $\mu\text{m}$ ) e outras 13 bandas no espectro emitido (3,0-15,0  $\mu\text{m}$ ). A resolução espacial das imagens geradas pelo sensor HSS está diretamente relacionada à altitude do voo e ao tipo de aeronave, com valores normalmente variando entre 2 e 9 metros (MENDES *et al.*, 2007).

Todas as bandas são quantizadas em 12 bits, com o campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field Of View* - IFOV) intercambiável de 1,25 e 2,5 mrad e FOV de 86°. A frequência de varredura do espelho é regulável entre cinco opções, de 6,25 a 100 Hz (MOREIRA *et al.*, 2005).

A partir da tensão/corrente, relacionada ao nível de excitação gerada pela radiação (oriunda da superfície), fornecida pelo elemento detector, acrescida dos fatores de *Ganho* e *Offset* introduzidos pelo operador, quantificada em valores discretos inteiros por meio de um *ND*, obtém-se a imagem de cada banda do sensor que juntas compõem um conjunto de imagens. Para o IFOV de 2,5 mrad, cada imagem possui 720 pixels por linha de varredura. No entanto, em cada imagem bruta, são registrados 723 pixels por linha. Os três pixels excedentes, localizados no início e no final da linha do imageamento, se referem a informações complementares do sistema.

Assim, no esquema ilustrativo da Figura 1 observa-se que a linha se inicia com a medida do primeiro pixel, o qual se refere à informação de codificação da linha. O segundo pixel é a medição da radiância proveniente do corpo negro de referência frio (temperatura mínima). Os pixels seguintes se referem aos dados da área de estudo e, o último pixel da linha de imageamento, é a medição da radiância do corpo negro e referência quente (temperatura máxima) (MOREIRA *et al.*, 2005).

Os valores da temperatura termodinâmica dos corpos negros de referência (CNR's) são ajustados pelo operador do sensor, o qual, em geral, considera, para o corpo negro frio, a temperatura de ponto de orvalho do dia do imageamento. Para

o corpo negro quente, é feita uma análise prévia dos materiais presentes na área de estudo e observada qual a temperatura máxima que se espera encontrar. Então, é ajustada a temperatura do corpo negro de referência quente para um valor acima desta.

Mesmo com estes critérios, pode ocorrer um efeito indesejável, que corresponde à combinação de uma baixa temperatura e uma baixa emissividade em determinados materiais da área de estudo (como metais, por exemplo). O resultado é que, para este tipo de alvo, a radiância medida é muito baixa, inferior ao valor discriminado pelo sistema. Assim, o valor do *ND* é apresentado como sendo igual a zero, perdendo-se a informação referente a este pixel. O mesmo ocorre quando o alvo tem emissividade muito próxima a 1, e sua temperatura termodinâmica é maior do que a temperatura do corpo negro de referência quente, ocorrendo então a extrapolação do *ND*. Neste caso, o valor deste pixel é fixado como sendo igual a 4095. Ambos os casos podem ser observados na Figura 2.

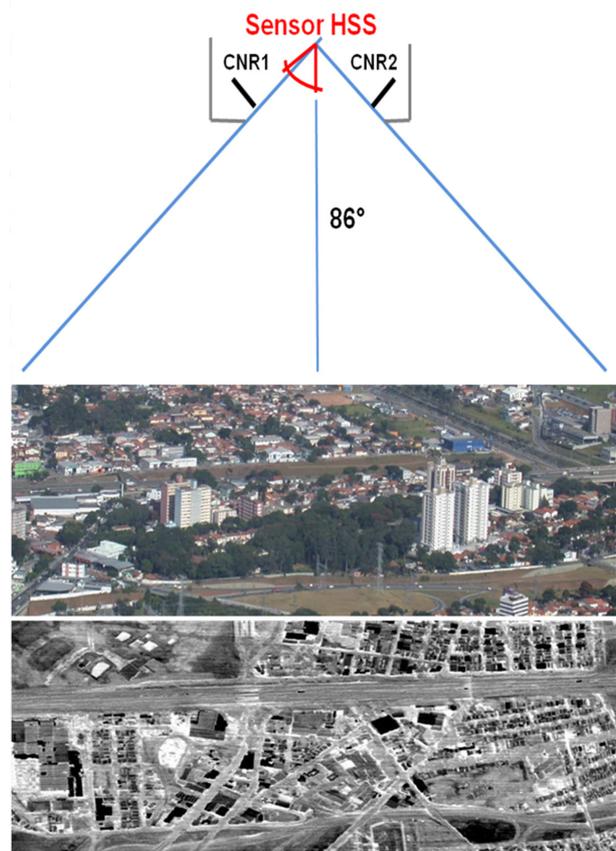


Fig.1- Esquema ilustrativo da aquisição de uma imagem pelo sensor HSS. Em a) fotografia aérea; Em b) Imagem da banda 48 (9,80  $\mu\text{m}$ ).

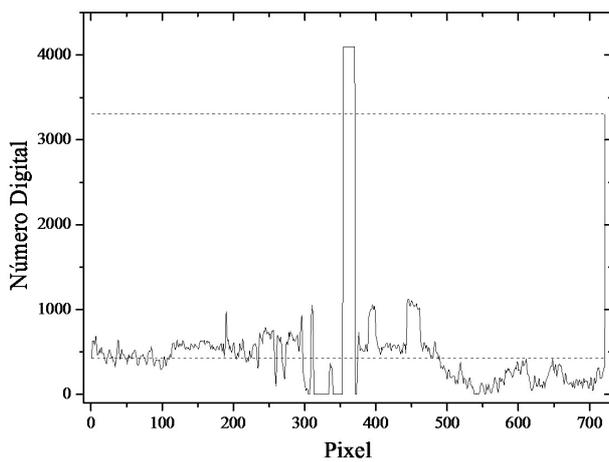


Fig. 2 - Relação entre os  $ND$ 's dos corpos negros de referência numa banda TIR e os pixels extrapolados. A linha tracejada horizontal inferior se refere ao  $ND$  do CNR1 e a linha tracejada horizontal superior ao  $ND$  do CNR2.

Portanto, as medições dos CNR's são utilizadas para relacionar o  $ND$  em função da radiância medida, em cada banda do sensor. Como a radiância proveniente dos CNR's depende da temperatura, estabelece-se, para cada banda, um vínculo não linear entre a temperatura dos corpos negros e o  $ND$  medido. As informações dos valores ajustados para a temperatura termodinâmica dos CNR's são armazenadas em arquivos auxiliares.

O sensor HSS possui um programa de importação e de processamento de dados fornecido pelo seu fabricante (*AHS Import Utility*), onde as imagens brutas são processadas podendo gerar imagens registradas entre si, corrigidas geometricamente para efeitos de varredura e de visada.

Além disto, o *AHS Import Utility* também converte os  $ND$ 's da imagem TIR em valores de temperatura de brilho. Para tal, utiliza as temperaturas termodinâmicas dos CNR's para ajustar linearmente a dependência da temperatura com os  $ND$ 's. Desta forma, considera tanto para os CNR's quanto para os pixels da imagem, uma emissividade igual a 1. Entretanto, este não é o procedimento correto, porque desta forma é obtida a temperatura de brilho para cada pixel, ao invés da radiância que é a grandeza física medida pelo sensor (ANDRADE *et al.*, 2010).

## 2.2. Conversão dos $ND$ 's em Radiância

Para converter os  $ND$ 's da imagem em radiância é necessário realizar uma calibração

radiométrica. Este processo tem início com a determinação da exitância espectral,  $B(T, \lambda)$ , por meio da equação de Planck (SCHOTT, 1997). Para as bandas da região termal do sensor HSS são utilizadas as temperaturas termodinâmicas dos CNR's,  $T_{CNR}$ , para determinar a exitância,  $B_{CNR}$ , com isto:

$$B_{CNR}(T_{CNR}, \lambda) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[ e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T_{CNR}} - 1 \right]} \quad (1)$$

Depois, é estimada a radiância espectral dos CNR's,  $L_{CNR}$ , por meio da sua exitância numa dada temperatura termodinâmica,  $T_{CNR}$ , considerando que: a) a superfície possui uma emissão isotrópica (ou seja, multiplicada por um fator  $1/\pi$ ); b) que a emissividade do CNR,  $e_{CNR}(\lambda)$ , é igual a 1; c) e que a transmitância é máxima, ou seja, igual a 1, além de ponderar pela Função de Resposta Espectral,  $FRE_b$ , de cada banda. Com isto:

$$L_{CNR}(T_{CNR}, \lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{B_{CNR}(T_{CNR}, \lambda)}{\pi} \cdot FRE_b(\lambda) \cdot \varepsilon_{CNR}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Assim, foi realizado um ajuste linear da radiância estimada em função dos  $ND$ 's, para cada CNR e obtidos os respectivos parâmetros,  $Ganho_b$  e  $Offset_b$ , para cada banda do sensor. Deste modo, para converter o  $ND$  de cada pixel em radiância medida pelo sensor para cada banda  $b$ ,  $L_{med,b}$ , tem-se (LILLESAND; KIEFER, 1994):

$$L_{med,b} = ND \cdot Ganho_b + Offset_b \quad (3)$$

## 2.3. Correção Atmosférica

A atmosfera, principal meio de propagação da radiação eletromagnética em sensoriamento remoto, possui em sua constituição diversos gases e partículas em suspensão, cada qual com diferentes concentrações. Sensores remotos multiespectrais são normalmente projetados para atuar nas chamadas "janelas atmosféricas" do espectro eletromagnético, que são regiões onde a influência da atmosfera é considerada pequena, porém este efeito não pode ser desprezado (BOREL, 2008). Os efeitos de absorção por diferentes constituintes da atmosfera requerem especial atenção com o uso

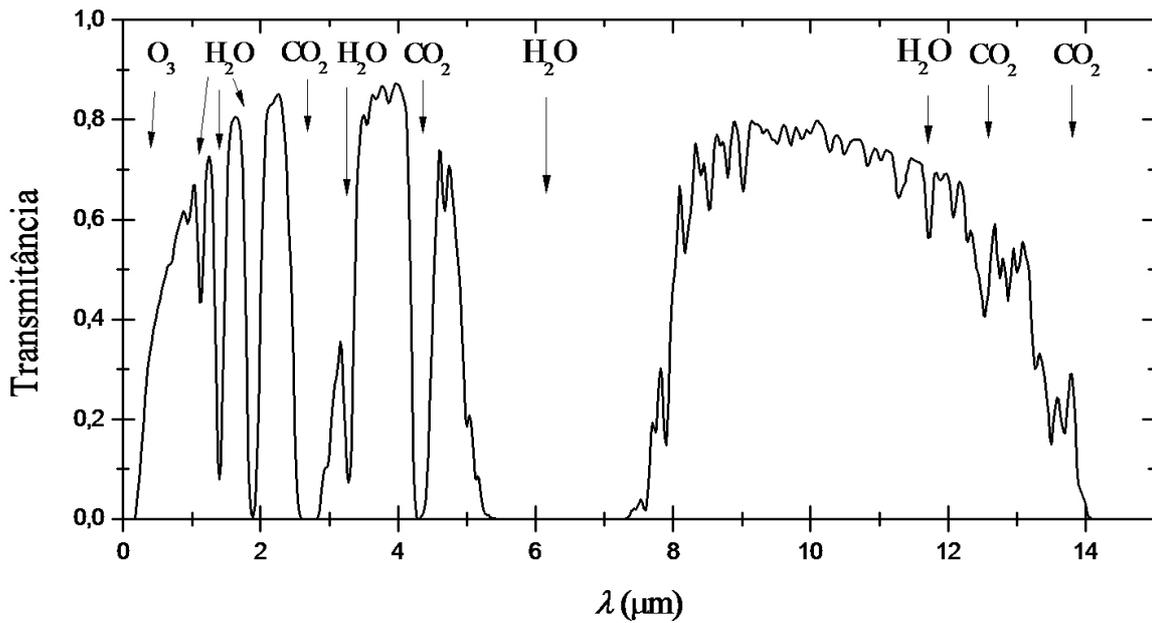


Fig.3 - Simulação da transmitância atmosférica para uma altitude em relação ao solo de 1 km utilizando o aplicativo PcModWin/MODTRAN. As moléculas absorvedoras responsáveis pelas bandas de absorção em cada comprimento de onda são indicadas.

de sensores com melhor resolução espectral, como o HSS, que adquirem dados em bandas mais estreitas. Esta influência pode ser maior ou menor, dependendo do comprimento de onda e da molécula absorvedora, como mostrado na Figura 3 para as regiões dos espectros refletido e emitido.

A radiância medida por um sensor remoto,  $L_{med}$ , pode ser obtida por meio de um modelo de transferência radiativa (JIMÉNEZ-MUÑOZ; SOBRINO, 2003) que descreve como a radiância se comporta quando esta entra em contato com a atmosfera. Assim, para um determinado comprimento de onda, tem-se:

$$L_{med}(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot L_e(\lambda) + \tau(\lambda) \cdot \{L_d(\lambda) \cdot [1 - \varepsilon_{alvo}(\lambda)]\} + L_a(\lambda) \quad (4)$$

Onde:  $\tau$  é a transmitância atmosférica;  $L_e$  é a radiância emitida;  $L_d$  é a radiância descendente atmosférica;  $\varepsilon_{alvo}(\lambda)$  é a emissividade do alvo;  $L_a$  é a radiância atmosférica ascendente.

O primeiro termo se refere à porção da radiância emitida pelo alvo, enquanto o segundo se refere à porção da radiância descendente refletida pelo alvo. Ambos os termos estão sob a influência da transmitância atmosférica. O terceiro termo se refere à radiância ascendente atmosférica. Entretanto, observa-se que para obter a

componente refletida da radiância medida pelo sistema sensor, é preciso estimar a radiância descendente atmosférica, que é composta pela exitância do céu,  $B(T_c, \lambda)$ , para uma dada temperatura do céu,  $T_c$ , e sua emissividade,  $\varepsilon_c(\lambda)$ .

Na literatura, são encontrados diversos métodos para estimar a emissividade do céu, com diferentes níveis de complexidade, que são aplicados de acordo com as informações disponíveis sobre a atmosfera e a área de estudo. Dentre estes métodos pode-se citar o de Berdahl e Fromberg (1982) apud Pérez-Garcia (2004), que apresenta uma abordagem empírica onde a emissividade do céu pode ser derivada de sua dependência à temperatura do ponto de orvalho,  $T_{po}$ , como pode ser observado em:

$$\varepsilon_c = 0,741 + 0,62 \left( \frac{T_{po}}{100} \right) \quad (5)$$

Para estimar a temperatura do céu é utilizada a temperatura de bulbo seco,  $T_{bs}$ , segundo Pérez-Garcia (2004):

$$T_c = \varepsilon_c^{1/4} \cdot T_{bs} \quad (6)$$

Este método foi estudado por Pérez-Garcia (2004) e apresentou bons resultados, sendo então, utilizado neste trabalho. Mais especificamente, este

método considera que existe diferença entre a distribuição da temperatura vertical durante o dia e à noite, e utiliza a temperatura do ponto de orvalho no momento do imageamento para estimar a emissividade do céu. Além disso, ele considera que a emissividade é constante em todos os comprimentos de onda.

Quando se tem conhecimento das propriedades ópticas da atmosfera e do processo de interação da radiação com a atmosfera e a superfície, além de dados meteorológicos auxiliares, é possível modelar a atmosfera com maior precisão utilizando algoritmos com equações que estimam os parâmetros físicos característicos da atmosfera em estudo. Entretanto, muito embora a modelagem considere um perfil vertical para a concentração de gases e partículas, a atmosfera é presumida uniforme e única sobre toda a área de estudo. Um exemplo é o *Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance algorithm and computer model* (MODTRAN), um dos algoritmos mais conhecidos utilizado na modelagem da transferência radiativa atmosférica, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas da Força Aérea dos Estados Unidos. Como este algoritmo não tem uma plataforma muito amigável, a Ontar Corporation desenvolveu o PcModWin que é uma versão para o Windows do MODTRAN (ONTAR, 2011).

O PcModWin/MODTRAN possui, além da possibilidade de inserção de dados externos, modelos de atmosfera padrões que estão embutidos no próprio modelo e podem ser utilizados de acordo com o conhecimento da área de estudo em relação à sua localização geográfica e tipo de cobertura da terra, por exemplo, além de dados do imageamento como a data da coleta da imagem e cobertura de nuvens, entre outros.

Para correção da imagem TIR, o PcModWin/MODTRAN permite estimar os parâmetros que possuem maior contribuição para os efeitos da atmosfera como a transmitância total  $\tau(\lambda)$  e a radiância ascendente,  $L_a(\lambda)$ , para a faixa de comprimento de onda entre 2 e 20 mm. A partir destes dados, estes parâmetros podem ser ponderados para cada uma das bandas,  $b$ , do sensor, obtendo-se um fator de transmitância,  $\tau_b$ :

$$\tau_b = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_b(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_b(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (7)$$

De maneira semelhante, são ponderadas a  $L_{a,b}$  e  $L_{d,b}$ , utilizadas no modelo de transferência radiativa descrito pela Equação 4, que, ao ser reescrita para as bandas do sensor HSS, fica igual a:

$$L_{med,b} = \tau_b \cdot L_{e,b} + \tau_b \cdot [L_{d,b} \cdot (1 - \varepsilon_{alvo,b})] + L_{a,b} \quad (8)$$

## 2.4. Estimativa da Emissividade Espectral Relativa e Temperatura da Superfície

A partir da radiância de superfície, ou seja, da radiância corrigida para os efeitos da atmosfera, pode-se obter a temperatura de brilho de cada pixel ao considerar que este possui emissividade de um corpo negro, ou seja, igual a 1. Entretanto, é fundamental que se conheça a emissividade dos materiais, os quais possuem emissividade menor que 1, para converter a temperatura de brilho em temperatura termodinâmica. Para estimar a emissividade de uma superfície deve-se considerar que seu comportamento espectral está relacionado à sua composição física, rugosidade, mistura de elementos dentro do mesmo pixel e geometria de imageamento, entre outros.

Estimar a emissividade e a temperatura da superfície por meio da radiância emitida pelos alvos da área de estudo é uma tarefa difícil, porque, para obter a temperatura, são necessárias, no mínimo: a medição da radiância em uma banda, a emissividade do alvo e dados atmosféricos. Por outro lado, não se conhece a emissividade de muitos alvos e, portanto, esta precisa ser determinada a partir da temperatura.

A solução para a determinação da temperatura e emissividade sempre incorre num número maior de incógnitas ( $N+1$ ) do que de variáveis medidas (GILLESPIE *et al.*, 1998), porque, ao medir a radiância por meio de  $N$  bandas de um sensor, não se pode obter  $N$  emissividades espectrais além da temperatura de superfície. Então, para determinar estes parâmetros, é necessário realizar medições de campo ou utilizar algum método que estabeleça determinados vínculos entre as emissividades e a temperatura. Desta forma, vários métodos têm sido aplicados para obter a emissividade espectral absoluta e outros para extrair a emissividade espectral relativa, que, neste caso, é obtida em relação a uma emissividade de referência

nas diferentes bandas, visando recuperar a forma do espectro para os diversos materiais.

Os principais métodos de estimativa da emissividade de um material, baseando-se apenas na imagem, são listados abaixo:

Emissividade Espectral Absoluta:  
*Day/Night method*  
*NDVI Thresholds Method - NDVI<sup>THM</sup>*  
*Normalized Emissivity Method – NEM*  
*Temperature/Emissivity Separation method – TES*

Emissividade Espectral Relativa:  
*Temperature-Independent Spectral Indices method – TISI*

*Reference channel method – REF*  
*Emissivity Normalization Method – NOR*  
*Emissivity RE-normalization method – RE*  
*ALPHA emissivity method – ALPHA*

Explicações e comparações entre estes métodos podem ser obtidas em Li *et al.* (1999), Sobrino *et al.* (2002), Jiménez-Muñoz (2005) e Jiménez *et al.* (2007). Os métodos mais comuns (NOR, REF e ALPHA) possibilitam obter as variações espectrais relativas da emissividade.

O método NOR normaliza a emissividade,  $e_{NOR}$ , para o valor definido como o máximo valor de emissividade,  $e_{max}$ , que se espera encontrar nas imagens TIR. Assim, assumindo que  $e_{NOR,b} = e_{max}$  para todas as bandas, é possível determinar a temperatura de cada pixel para cada banda,  $T_{NOR,b}$ , (CASELLES, *et al.*, 1999), determinando a temperatura para que a exitância,  $B_b$ , seja igual à radiação proveniente do alvo, conforme a equação:

$$B_b(T_{NOR,b}) = \frac{L_{med,b} - (1 - \varepsilon_{NOR,b})I_{atm,b}}{\varepsilon_{NOR,b}} \quad (9)$$

Onde:  $I_{atm,b}$  é a irradiância atmosférica.

Em seguida, é verificado qual o valor máximo da temperatura, dentre os estimados para cada banda. Este valor máximo é definido como a temperatura de superfície,  $T_s$ . Esta temperatura é, então, utilizada para recalculer a emissividade dos pixels em cada banda,  $\hat{a}_b$ , dividindo a radiação medida por cada banda do sensor,  $L_{med,b}$ , pela exitância de corpo negro para o valor máximo da temperatura que é a temperatura de superfície. Com isto:

$$\varepsilon_b = \frac{L_{med,b}}{B_b(T_s)} \quad (10)$$

O método REF também extrai a emissividade relativa e a temperatura dos pixels de uma imagem. Para tal, assume que a emissividade em uma dada banda é constante para todos os pixels da imagem e, então, obtém-se a temperatura destes pixels, a qual é considerada temperatura da superfície de todas as bandas. Assim, como a temperatura de superfície é a mesma para todas as bandas, é possível estimar a emissividade para cada pixel da imagem de cada banda, como explicado algebricamente pela Equação 10.

Já o método ALPHA estima o comportamento da emissividade a partir da aproximação de Wien para a Equação de Planck, isto é:

$$B_w(T, \lambda) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} \right]} \quad (11)$$

Com esta aproximação, é possível linearizar a equação, utilizando logaritmos. Assim, tem-se uma equação para cada banda, onde os valores da radiação e emissividade são diferentes, enquanto a temperatura é a mesma. Depois de algumas manipulações algébricas (KEALY; HOOK, 1993; LI *et al.*, 1999), elimina-se, pela subtração da equação de cada banda pela equação da média de todas as bandas, o termo referente à temperatura da superfície. Então, o valor alpha é estimado para cada banda. Considerando-se todas as bandas, obtém-se o espectro de emissividade alpha. Este espectro é uma função da emissividade e só tem a forma semelhante aos espectros de emissividade, com uma média zero. Portanto, a única comparação dos espectros de emissividade com espectros alpha ocorre pela forma do espectro, desconsiderando-se a escala. Também é conveniente lembrar que este método é independente da temperatura da superfície.

Segundo Li *et al.* (1999), os erros associados aos diferentes métodos de estimativa da temperatura e emissividade são, geralmente, devido à simplificação dos métodos, ruído e erro de

calibração do sensor remoto utilizado e às incertezas devido à correção atmosférica.

### 3. METODOLOGIA

As imagens de interesse foram selecionadas de uma campanha de imageamento e calibração realizada em 30 de maio de 2006, na cidade de São José dos Campos, que está a uma altitude média de 600 m. Foram realizados voos diurnos e noturnos a uma altura de aproximadamente 1.090 m sobre o terreno. Como o sensor foi ajustado para o IFOV de 2,5 mrad e frequência de varredura de 25 Hz, foi obtida resolução espacial aproximada de 2,9 m ao nadir, no ponto de referência de altura, 646 m, a cabeceira da pista do Aeroporto de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf, e uma largura de faixa de 2,1 km visto que o FOV foi de 86°. O intervalo de tempo entre uma faixa e outra foi de 15 minutos. Houve sobreposição das áreas imageadas, resultando na observação de alguns alvos em mais de uma imagem. Estes parâmetros foram escolhidos, na campanha de imageamento e calibração, visando utilizar a melhor configuração do conjunto sistema sensor e aeronave, respeitando os requisitos necessários da imagem.

Para selecionar as imagens utilizadas neste estudo, foi feita uma avaliação qualitativa das imagens obtidas em relação aos ruídos e distorções geométricas causadas por movimentos da aeronave, entre outros. Também, foram verificadas as condições dos corpos negros de referência quanto à estabilidade da temperatura e ao ajuste dos *ND*'s.

Realizadas estas avaliações prévias, as imagens brutas foram registradas entre si e corrigidas

geometricamente para efeitos de varredura e de visada por meio do programa de processamento de imagens do sensor *AHS Import Utility* (SENSYTECH, 2002).

Os parâmetros do voo para aquisição das imagens no período noturno em 30 de maio de 2006 são apresentados na Tabela 1. Foram utilizadas imagens das 13 bandas posicionadas no TIR. As temperaturas, mínima e máxima, dos corpos negros de referência foram definidas como 16,9 e 44,6 °C, por representar o intervalo de temperaturas superficiais extremas esperadas para a área urbana em estudo.

#### 3.1 Conversão dos *ND*'s em Radiância

Para converter os *ND*'s das imagens do espectro emitido obtidas no sobrevoo noturno para radiância da superfície, foi realizada uma avaliação dos ajustes das temperaturas termodinâmicas dos CNR's e sua correlação com os *ND*'s, para verificar eventual ocorrência de pixels com valores extrapolados.

Depois, foi observada a flutuação dos *ND*'s dos CNR's visando estimar o ruído na imagem, tendo como base os trabalhos de Castro *et al.* (2005 e 2007). Assim, o ruído foi determinado pela razão do desvio padrão dos *ND*'s do CNR2, ajustado com a maior temperatura, pelo valor médio dos *ND*'s do mesmo. Esta análise inicial de qualidade das imagens TIR foi um dos parâmetros que determinaram quais, das 13 bandas, poderiam ser utilizadas no trabalho.

Além disto, para estimar a incerteza final da temperatura levou-se em consideração a incerteza

Tabela 1 - Parâmetros do voo e configuração do sensor.

Parâmetro		Noturno
Coordenada central	Latitude:	23.2875 °S
	Longitude:	45.7967 °W
Altura do sensor em relação ao solo		1.090 m
Altitude média		600 m
Tamanho do pixel		2,9 m
Data aquisição		30/05/2006
Hora aquisição		21h06
IFOV		2,5 mrad
Frequência de varredura		25 Hz
Temperatura CNR1		44,6°C
Temperatura CNR2		16,9°C

do instrumento,  $\sigma_{inst}$ , neste caso, o sensor HSS. Esta incerteza pode ser estimada, por exemplo, a partir da conversão da flutuação em radiância do CNR2 na banda 50 em temperatura. Utilizando esta estimativa, obteve-se uma incerteza instrumental de 0,5 °C. Com isto, a incerteza final,  $\sigma_f$ , é dada pela expressão:

$$\sigma_f = \sqrt{(\sigma_m)^2 + (\sigma_{inst})^2} \quad (12)$$

Onde:  $\sigma_m$  é o desvio padrão da média de um número de pixels extraído da imagem.

Uma vez avaliados os dados de temperatura termodinâmica e os  $ND$ 's dos CNR's, cuja primeira foi utilizada para obter a radiância das imagens das bandas 41 a 50, por meio da calibração em radiância (seção 2.2), foram determinados, então, os coeficientes de calibração e, em seguida, foi realizada a interpolação linear entre as radiâncias com base nos  $ND$ 's obtidos nas imagens de cada banda, utilizando a Equação 3.

Obtidas as imagens em radiância que chega ao sensor, foi necessário avaliar e corrigir os efeitos da atmosfera visando obter imagens em radiância de superfície. Para tal, foi preciso estimar a radiância descendente, a transmitância e a radiância ascendente atmosférica no momento do imageamento noturno (seção 2.3).

Para determinar a radiância descendente atmosférica, primeiramente foi preciso estimar a emissividade e a temperatura do céu (atmosférica) (Equações 5 e 6), utilizando os dados de temperatura de ponto de orvalho, 15,4 °C, e de temperatura de bulbo seco, 18,1 °C, obtidos da estação meteorológica localizada no Aeroporto de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf. Assim, estimou-se a temperatura e a emissividade do céu, que foram, respectivamente, 5,4 °C e 0,84, com as quais foi determinada a radiância descendente.

A transmitância atmosférica e a radiância ascendente foram estimadas utilizando o PCModWin/MODTRAN, sendo que: o modelo de atmosfera adotado foi o Tropical; as estações do ano assumidas foram outono/inverno devido ao período do ano; e a concentração de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) foi de 360 ppm (CONWAY *et al.*, 1994). O modelo de aerossol adotado foi o urbano com visibilidade de 40 km. Foram utilizadas 33

camadas atmosféricas, número máximo permitido pelo programa, com camadas mais próximas da superfície terrestre. Também foi realizado um refinamento dos dados de umidade relativa do perfil atmosférico utilizando dados obtidos por radiossondagem do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP) no Aeroporto Campo de Marte, local mais próximo à área coberta pela imagem no dia do imageamento.

Uma vez estimadas a transmitância e a radiância ascendente atmosférica para as bandas do espectro emitido das imagens noturnas, elas foram ponderadas pela  $FRE_b$  (Equação 7).

### 3.2 Estimativa da Emissividade Relativa e Temperatura da Superfície

Foram estimadas a temperatura e a emissividade da superfície utilizando as imagens TIR do imageamento noturno de boa qualidade. Para avaliar o comportamento espectral da emissividade e a temperatura de superfície dos componentes de cena da área de estudo, foram utilizados os métodos NOR, REF e ALPHA, já descritos na seção 2.4.

Para estimar a emissividade e a temperatura de cada pixel da imagem pelo método NOR, a emissividade inicial adotada foi de 0,98, que é a mais próxima da emissividade da maioria dos materiais, e que mais se aproxima à de um corpo negro, para todas as bandas.

Para o método REF, a emissividade inicial adotada também foi de 0,98 e a banda adotada como banda de referência foi a 50 (12,02  $\mu m$ ) por apresentar um dos menores níveis de ruído.

Assim, a partir das imagens em emissividade, estimadas pelos três métodos, NOR, REF e ALPHA, foi extraída a emissividade espectral relativa de um total de 265 pixels para alguns dos principais materiais presentes nas imagens da área de estudo, tais como: vegetação, asfalto, cerâmica, fibrocimento, aço galvanizado acinzentado e concreto. Uma vez que não há disponibilidade de biblioteca espectral obtida no Brasil destes materiais, os espectros de emissividade, obtidos com os três métodos, foram comparados entre si.

Já para avaliar os valores de temperatura de superfície foram utilizados dois métodos: o NOR e o REF. Os parâmetros adotados neste procedimento foram os mesmos usados na estimativa da emissividade. Assim, obtidas as imagens em temperatura de superfície por ambos os métodos,

os valores de temperatura foram obtidos para o mesmo conjunto de 265 pixels, mencionado no parágrafo anterior. Os resultados foram comparados entre si, uma vez que não foram feitas medições em campo durante o sobrevoo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Conversão dos ND's em Radiância e Correção Atmosférica

Ao avaliar a estabilidade dos CNR's ao longo do imageamento, foi verificado que os mesmos se mantiveram estáveis com uma variação de  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  em torno da média da temperatura termodinâmica (Figura 4). Entretanto, os valores em ND's dos CNR's medidos pelos detectores variaram em até 100 ND's, em torno da média, para as bandas 39 a 43, enquanto que para as demais bandas, a variação foi de 100 a 200 ND's. Esta variação ocorreu, provavelmente, devido ao ruído inerente do sistema sensor, além de uma pequena correlação entre os CNR's.

Embora para a maioria das bandas, os ND's dos CNR1 e CNR2 tenham sido ajustados corretamente para as bandas 38 ( $3,20\text{ }\mu\text{m}$ ), 39 ( $3,50\text{ }\mu\text{m}$ ) e 40 ( $3,86\text{ }\mu\text{m}$ ) estes valores foram ajustados muito próximos um do outro. Estes valores deveriam estar mais afastados entre si para que a calibração em radiância apresentasse resultados coerentes, ou seja, para que a imagem pudesse ser convertida de ND's para radiância.

Assim, devido aos ajustes de *Ganho e Offset* destas bandas, as imagens apresentaram baixa

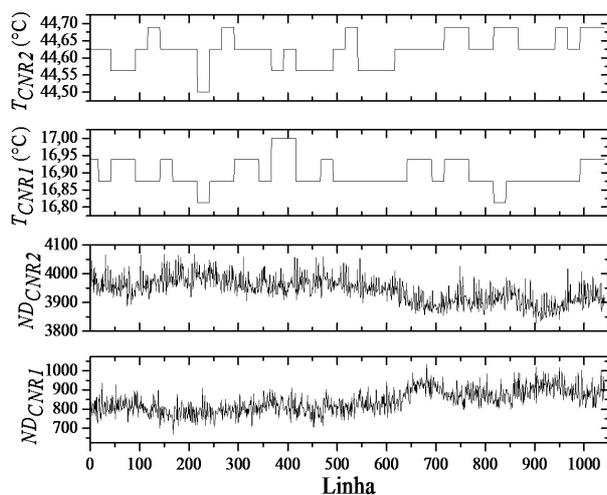


Fig. 4 - Avaliação da estabilidade da temperatura termodinâmica dos corpos negros de referência ao longo do imageamento e seus ND's para a imagem noturna da banda 48 ( $9,80\text{ }\mu\text{m}$ ).

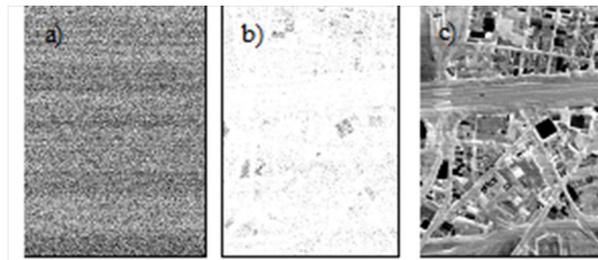


Fig. 5 - Imagens em tons de cinza da radiância obtidas no imageamento noturno para diferentes bandas do HSS, sendo as duas primeiras de baixa e a última de boa qualidade. Em a) banda 38 ( $3,20\text{ }\mu\text{m}$ ); b) banda 39 ( $3,50\text{ }\mu\text{m}$ ); c) banda 48 ( $9,80\text{ }\mu\text{m}$ ).

qualidade, impedindo sua utilização neste trabalho, como pode ser observado na Figura 5, na comparação entre as duas bandas com problemas de ajuste e a banda 48 ajustada corretamente.

Aplicada a metodologia para estimativa do ruído, verificou-se que a banda 38 apresentou o maior ruído (21,3%), enquanto que as bandas 39 e 40 apresentaram valores em torno de 4%. Para as demais bandas, o ruído foi menor que 1% (Figura 6). A alta porcentagem de ruído estimada para a banda 38 é mais um indicativo da baixa qualidade da sua imagem, tendo sido assim, descartada neste trabalho. Portanto, as imagens das bandas 38, 39 e 40 não foram utilizadas neste trabalho devido à baixa qualidade causada pelo ajuste inadequado de *Ganho e Offset* e pelo ruído presente na imagem da banda 38 causado pelo sistema sensor.

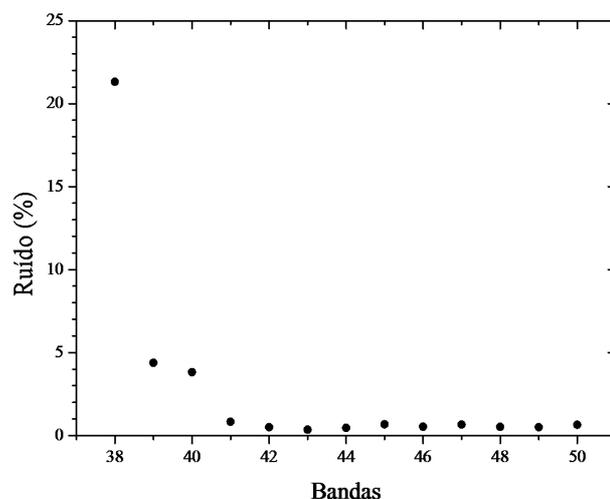


Fig. 6 - Porcentagem do ruído presente nas imagens das bandas TIR do sensor HSS obtidas no imageamento noturno.

Tabela 2 – Coeficientes de calibração das bandas do espectro emitido.

Bandas	Offset	Gain
	W / m <sup>2</sup> ·sr·nm	W / m <sup>2</sup> ·sr·nm
41	-0,396	0,0012
42	-0,3763	0,0011
43	0,6688	0,001
44	1,3057	0,0011
45	4,5731	0,0024
46	6,5125	0,0017
47	6,3699	0,0018
48	7,055	0,0015
49	7,1399	0,0017
50	7,2447	0,0012

Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes de calibração resultantes da aplicação da metodologia adotada, após a utilização dos dados de temperatura termodinâmica dos CNR's, conforme descrito nas seções 3.1 e 2.2.

Na Figura 7, é apresentado o gráfico de temperatura de brilho de um alvo, quando a emissividade é igual a 1, em função do ND, obtido com a metodologia desenvolvida neste trabalho para a banda 49, do sensor HSS. Como mencionado anteriormente, a dependência da temperatura com o ND fornece uma curva, visto que a calibração da radiância em função do ND é linear, de acordo com a metodologia descrita na seção 2.2. Na figura também se observa, para comparação, a temperatura de brilho fornecida pelo programa do

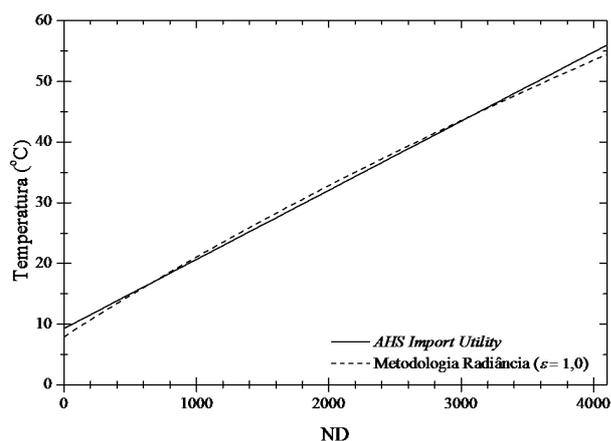


Fig. 7 - Comparação entre a temperatura de brilho estimada para cada ND da imagem noturna da banda 49 (10,81 μm). A reta, em linha cheia, representa os resultados obtidos com o software do sensor. A curva, em linha tracejada, é o resultado obtido por meio da calibração em radiância desenvolvida neste trabalho.

sensor, o *AHS Import Utility*, que apresenta um comportamento linear, diferente do esperado.

Usando a metodologia descrita nas seções 2.3 e 3.1, foi modelada a atmosfera no momento do imageamento. Em seguida, foram ponderadas a transmitância, a radiância ascendente e a radiância descendente pelas FRE's das bandas TIR do sensor HSS. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Verifica-se que na região espectral das bandas 41 a 44, ou seja, de 4,05 a 5,42 μm, a radiância medida pelo sensor é muito baixa. Portanto, tendo grande influência da radiância ascendente. Além disto, a transmitância atmosférica é menor que 50%, por causa da influência do vapor d'água. Estes fatores, somados, fazem com que a radiação, principalmente a proveniente da emitância do alvo, captada nestas bandas seja baixa e, conseqüentemente, muito suscetível ao ruído inerente do sistema sensor e à influência da atmosfera. Portanto, as bandas viáveis ao estudo, verificadas por esta avaliação, foram da janela atmosférica de 8 a 12,5 μm (bandas 45 a 50) que são as normalmente utilizadas em estudos termais, mesmo em sistemas sensores que possuam bandas na região entre 3,3 e 5,4 μm (SOBRINO *et al.*, 2006; JIMÉNEZ *et al.*, 2007).

#### 4.2 Estimativas da Emissividade e Temperatura pelos Métodos NOR, REF e ALPHA

A partir das imagens em radiância, corrigidas para os efeitos da atmosfera (seção 2.3 e 3.1), para as bandas 45 a 50, foram obtidas as imagens em emissividade e temperatura termodinâmica da superfície (Figura 8).

Tabela 3 - Parâmetros atmosféricos utilizados na correção das imagens TIR.

Banda	Comprimento de Onda Central ( $\mu\text{m}$ )	Radiância Descendente	Radiância Ascendente	Transmitância
		( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$ )	( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$ )	
41	4,25	0,122	0,477	0,439
42	4,61	0,212	0,636	0,496
43	4,95	0,32	1,294	0,341
44	5,28	0,438	3,354	0,044
45	8,18	1,574	3,63	0,536
46	8,68	1,682	2,445	0,707
47	9,16	1,756	2,138	0,752
48	9,8	1,812	2,05	0,767
49	10,81	1,821	2,326	0,73
50	12,02	1,736	3,137	0,607

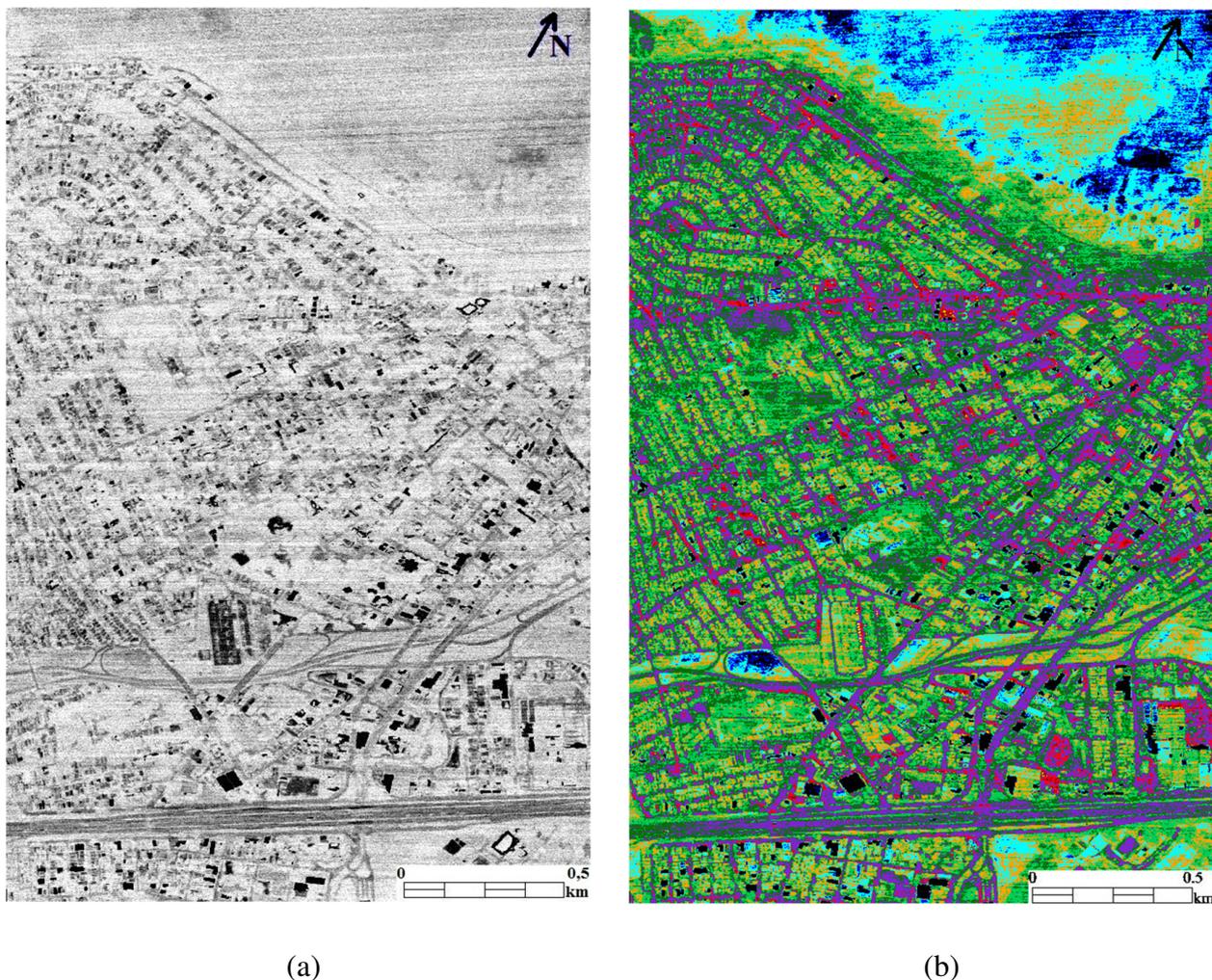


Fig. 8 - Imagens de emissividade e de temperatura termodinâmica da superfície, obtidas pelo método NOR. Em a) Imagem em tons de cinza da emissividade para a banda 47. Conforme os níveis de cinza ficam mais claros, mais próxima de 1 é a emissividade do material; b) Imagem em temperatura termodinâmica de superfície fatiada ( $^{\circ}\text{C}$ ), cujo pixel classificado em preto não apresenta dado coerente.

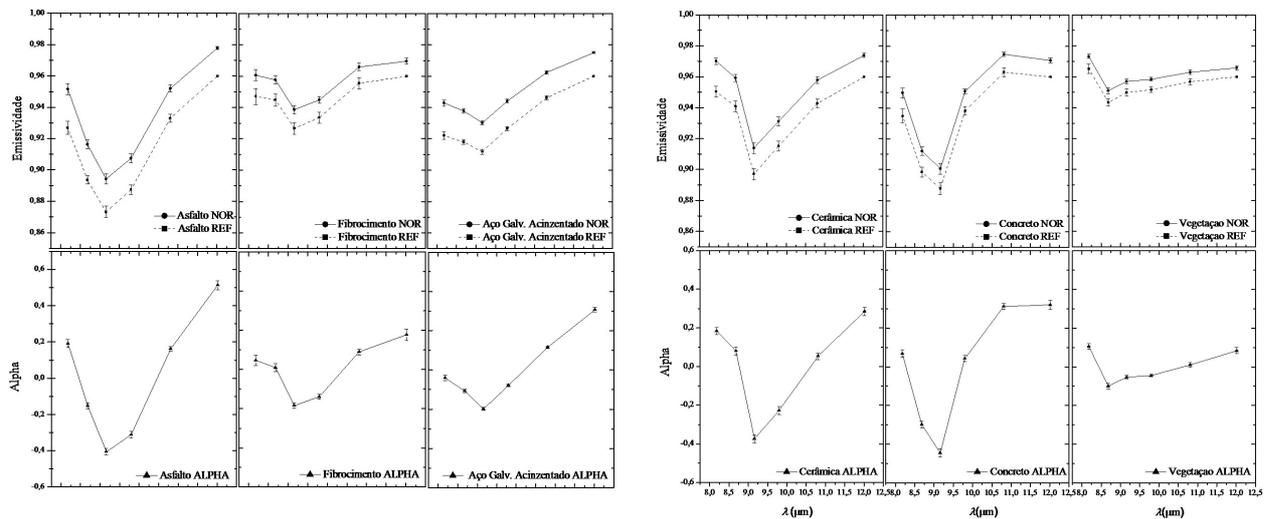


Fig. 9 - Emissividade espectral relativa de alguns materiais presentes na área de estudo obtida pelos métodos NOR, REF e ALPHA. Os símbolos representam os centros das bandas TIR (45 a 50) do HSS.

Conforme descrito anteriormente na seção 3.2, para avaliar o comportamento da emissividade espectral, obtida pelos métodos NOR, REF e ALPHA, foram selecionados 265 pixels para alguns materiais típicos de interesse: vegetação, asfalto, cerâmica vermelha, fibrocimento, aço galvanizado (aspecto acinzentado devido à exposição ao tempo) e concreto. Assim, devido ao número de pixels extraídos para cada um dos materiais, calculou-se a média e o desvio padrão da média,  $\sigma_m$ , da emissividade em cada banda.

Os resultados obtidos para a emissividade espectral dos materiais selecionados podem ser observados na Figura 9. No geral, as formas dos espectros de emissividade dos mesmos materiais, obtidas pelos três métodos, foram semelhantes. É conveniente lembrar que somente podemos comparar a forma dos espectros, visto que os métodos utilizados estimam a emissividade relativa, ou seja, é obtida em relação a uma emissividade de referência que pode ser definida pelo usuário para os métodos NOR e REF. Para o ALPHA, obtém-se um valor que não é a emissividade relativa e sim a forma do espectro.

Também foi realizada uma comparação por meio da diferença entre as temperaturas termodinâmicas obtidas pelos métodos NOR e REF usando os 265 pixels. Foram determinadas: a média da temperatura, o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o desvio padrão da média ( $\sigma_m$ ), (Tabela 4).

Verificou-se que a temperatura obtida pelo método NOR esteve sempre abaixo da temperatura estimada pelo método REF, possivelmente devido à simplificação que cada método faz em relação à

emissividade inicial. Ao comparar os métodos NOR e REF, Kealy e Hook (1993) observaram que o NOR possui maior exatidão para estimar a temperatura do que o REF, porque as diferenças na emissividade dos materiais terrestres, as quais ainda são pouco conhecidas, introduzem erros na estimativa da temperatura da superfície.

Assim, utilizando as imagens obtidas pelo imageamento noturno realizado de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 1, foi observado que o material concreto foi o material mais quente encontrado na área de estudo, com uma temperatura média de 23,40 °C, um desvio padrão de 1,34 °C. O desvio padrão da média foi de 0,08 °C, fornecendo uma incerteza final de 0,5 °C (Equação 3.1). Outro material “quente” foi o asfalto, que apresentou uma temperatura média de 21,00 °C e um desvio padrão de 1,81 °C.

O material mais frio foi o aço galvanizado acinzentado com uma temperatura média de 12,41 °C e desvio padrão de 1,37 °C, possivelmente devido à sua baixa emissividade e por dispersar o calor mais facilmente devido ao seu calor específico. Dentre os materiais naturais, a vegetação rasteira apresentou o menor valor médio de 15,10 °C e desvio padrão 2,49 °C, (Tabela 4), provavelmente devido ao solo úmido da região da concha do Banhado do Rio Paraíba do Sul presente na composição do pixel referente ao material vegetação rasteira.

Além disto, materiais metálicos polidos presentes na imagem, cujas emissividades são muito menores do que a emissividade do corpo negro, ou seja, muito abaixo de 1, com uma temperatura

Tabela 4 - Comparação da temperatura da superfície estimada pelo NOR e REF.

Materiais	Temperatura (°C)					
	Método NOR			Método REF		
	Média	$\sigma$	$\sigma_m$	Média	$\sigma$	$\sigma_m$
Asfalto	21	1,81	0,08	22,19	1,73	0,08
Concreto	23,4	1,34	0,08	23,92	1,48	0,08
Cerâmica Vermelha	13,77	1,23	0,07	14,38	1,23	0,07
Fibrocimento	15,52	1,04	0,05	16,25	1,19	0,05
Aço Galvanizado Acinzentado	12,41	1,37	0,09	13,46	1,36	0,09
Vegetação Arbórea	17,63	1,74	0,08	18,22	1,9	0,08
Vegetação Rasteira	15,1	2,49	0,1	15,86	2,52	0,11

termodinâmica baixa, corresponderam aos pixels mais escuros da imagem em emissividade, porque os métodos ajustam estes pixels extrapolados para a menor emissividade estimada. Entretanto, este dado não é correto e deve ser desprezado. O mesmo ocorre com a temperatura termodinâmica estimada para estes materiais, uma vez que a emissividade é muito baixa e a temperatura determinada pelos métodos é ajustada para a temperatura mínima. Embora, na imagem em radiância estes materiais apresentem valor de  $ND's$  como sendo zero, os métodos de estimativa da emissividade e temperatura consideram este dado como útil, porque ele faz parte da imagem. Assim, materiais como telhados metálicos sem pintura foram descartados na análise dos resultados obtidos de emissividade e temperatura.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi obtida pela primeira vez uma imagem em radiância das bandas termiais do sensor HSS. Para tal, foi necessário desenvolver uma metodologia de calibração em radiância que pudesse ser aplicada ao Sensor HSS, como também em outros sensores. Além disto, para o processamento das imagens termiais, foram utilizados métodos para extração da emissividade e temperatura, também inéditos para o sensor HSS.

A metodologia utilizada para obter as imagens em radiância das bandas termiais se inicia com a estimativa da existância espectral dos corpos negros de referência e termina com a determinação dos coeficientes de calibração (*Ganho* e *Offset*) de cada banda. A diferença nos valores de temperatura

de superfície encontrada entre esta metodologia e a aplicada pelo programa *AHS Import Utility* aumenta conforme diminui a emissividade dos componentes de cena, uma vez que o programa estima a temperatura de brilho considerando a emissividade igual a 1 para todos os pixels, o que não é real. Portanto, é preciso conhecer o processo de aquisição das imagens termiais e as etapas de processamento aplicadas para obter imagens em grandeza física, seja radiância, temperatura ou emissividade, ao se utilizar os dados de sensoriamento remoto termal visando evitar erros de análise do objeto de estudo.

Ao se testar comparativamente os métodos NOR, REF e ALPHA para estimativas da emissividade relativa dos principais componentes de cena, obteve-se resultados coerentes e muito semelhantes quanto à forma dos espectros. Muito embora estes métodos não tenham sido projetados para aplicação em dados de alta resolução espacial e espectral, eles são capazes de fornecer informações confiáveis sobre a emissividade espectral relativa dos materiais em estudo, mais especificamente em superfícies urbanas.

Ao se testar comparativamente os métodos NOR e REF para a estimativa da temperatura da superfície, observou-se uma diferença de até 1,2 °C na estimativa da temperatura para todos os materiais analisados, sendo que a temperatura estimada pelo método NOR foi sempre mais baixa do que a temperatura estimada pelo método REF.

Desta forma, fica evidente o grande potencial das imagens das bandas do sensor HSS no espectro emitido, que, aliada à alta resolução espacial, pode

possibilitar o estudo da emissividade e da temperatura dos componentes de cena com respeito ao uso e composição do espaço urbano.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao 1º/6ºGAv., que disponibilizaram equipamentos, dados e/ou meios para a realização do trabalho. Os autores também agradecem aos revisores anônimos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L.L.; SOUZA, L. H.; SAKURAGI, J.; CASTRO, R.M. Estudo de ilhas de calor na cidade de São José dos Campos utilizando o canal infravermelho termal do Landsat-5 e o aerotransportado HSS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.473-480. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.

ANDRADE, L. L.; CASTRO, R. M. GALVÃO, L. S. Conversão dos ND's em radiação e temperatura de imagem de sensoriamento remoto termal. In: Seminário de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv - SICI, 4, São José dos Campos, 2010. **Anais...** São José dos Campos: IEAv, v.1, p. 95-96.

BOREL, C. Error analysis for a temperature and emissivity retrieval algorithm for hyperspectral imaging data. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.17-18, p.5029-5045, 2008.

CASELLES, V.; COLL, C.; RUBIO, E.; VALOR, E.; SOSPEDRA, F. Medida de la temperatura y la emisividad con datos multiespectrales del sensor DAIS. In.: Congreso Nacional de Teledetección, 10, Albacete, Espanha, 1999. **Proceedings...** Espanha: Teledetección: Avances y Aplicaciones, 1999, p.343-346.

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, 12, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p. 355-362. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.

CASTRO, R.M.; MOREIRA, R.C.; ESPOSITO, E.S.C. Avaliação em laboratório do sensor HSS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,

13, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6443-6448. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.

CONWAY, T. J.; TANS, P. P.; WATERMAN, L. S.; THONING, K. W.; KITZIS, D.; MASARIE, K. A.; ZHANG, N. Evidence for inter-annual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network, **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v.99 n.D11, p.22831-22855, 1994.

GILLESPIE, A.; ROKUGAWA, S.; MATSUNAGA, T.; COTHERN, J. S.; HOOK, S. J.; KAHLE, A. B. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n. 4, p. 1113-1126, 1998.

HOOK, S. J.; MEYERS, J. J.; THOME, K. J.; FITZGERALD M.; KAHLE, A. B. The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) – a new instrument for earth science studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n.1, p.93-102, 2001.

JIMÉNEZ, M.; CHICO, J., DE MIGUEL, E.; GÓMEZ, J.A.; SOBRINO, J.A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; PRADO, E.; ROBLES, C. Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) Spectral Emissivity Retrieval in 8-13mm. In. **Proceedings...**International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, 10, Davos, Suíça, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2007.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J.A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n.d22, p. ACL2-1 – ACL2-9, 2003.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. **Estimación de la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre a partir de datos suministrados por sensores de alta resolución.** Tese (Doutorado em Física). ISBN.: 84-370-6145-8 Universidad de Vailencia, Espanha, 378p., 2005.

- KEALY, P. S.; HOOK, S. J. Separating Temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n. 6, p. 1155-1164, 1993.
- LEAVER, F.; THOMAS, O. Scene-Based Atmospheric Correction Methods for LWIR Hyperspectral Sensors. **In proceedings... EMRS DTC Technical Conference**, 3, Edinburgh, 2006. Disponível em: [http://www.emrsdte.com/conferences/2006/downloads/pdf/conference\\_papers/B022.pdf](http://www.emrsdte.com/conferences/2006/downloads/pdf/conference_papers/B022.pdf) Acesso em: 21 jan. 2010.
- LI, Z.-L.; BECKER, F.; STOLL, M. P.; WAN, Z. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. **Remote Sensing of Environment**, v.69, n.3, p.197-214, 1999.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.M. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. New York: J. Wiley, 1994, 750 p.
- LU, D.; WENG, Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n. 2, p. 157-167, 2006.
- MENDES, V. L.; MOREIRA, R. C.; CASTRO, R. M. Planejamento para aquisição de imagens com o sensor de varredura aerotransportado HSS instalado no R-95. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 6473-6480, 2007.
- 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, 12, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 4517-4524, 2005.
- ONTAR. PcModWin - Overview [on line]. Ontar Corporation. Disponível em: <http://www.ontar.com/Software/ProductDetails.aspx?item=PcModWin> Acesso em: set, 2011.
- PÉREZ-GARCIA, M. Simplified modelling of the nocturnal clear sky atmospheric radiation for environmental applications. **Ecological Modelling**, v.180, n.2-3, p.395-406, 2004.
- SCHOTT, J.R. **Remote sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University Press, 1997, 401 p.
- SENSYTECH, INC. **AA5201 AHS Airborne Hyperspectral Scanner System: operator manual**. Ann Arbor, MI: SENSYTECH, v. 1, 2002. 86p.
- SMALL, C. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 168-189, 2006.
- SOBRINO J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. LABED-NACHBRAND, J.; NERRY, F. Surface emissivity retrieval from Digital Airborne Imaging Spectrometer data. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n. D23, p. ACL 24-1 - 24-13, 2002.
- SOBRINO J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., ZARCO-TEJADA P. J., SEPULCRE-CANTÓ, G., MIGUEL, E. de. Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, n. 1-2, p. 99-115, 2006.
- WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v.89, n.4, p.467-483, 2004.