

CONVERSÃO DE DADOS RADIOMÉTRICOS ORBITAIS POR DIFERENTES METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO ATMOSFÉRICA

Luís Gonçalves Longo de Oliveira, Flávio Jorge Ponzoni e Elisabete Caria Moraes

Recebido em 30 maio, 2008 / Aceito em 28 janeiro, 2009
Received on May 30, 2008 / Accepted on January 28, 2009

ABSTRACT. The conversion of digital numbers (DN) from orbital images to physical quantities of the Earth surface is dependent on trusted atmospheric characterization, which has been performed through the application of data collected from meteorological balloons or by solar photometers positioned at the Earth surface. Recently some orbital sensors have generated useful data that could be utilized in this characterization like those generated by sensor MODIS. Here, surface Bidirectional Reflectance Factors (BRF) estimated from field data were compared to those calculated from TM/Landsat-5 converted images through radiative transfer codes. The input data of these codes were estimated considering two different sources: the solar photometer and the MODIS sensor. The results have indicated that the MODIS data can be applied in the DN to surface BRF conversion.

Keywords: atmospheric correction, solar photometer, MODIS.

RESUMO. A conversão de números digitais (NDs) de imagens orbitais em quantidades físicas relacionadas às propriedades espectrais de objetos presentes na superfície terrestre é dependente de fiel caracterização atmosférica, a qual tem sido realizada com medidas obtidas por balões meteorológicos ou por fotômetros solares posicionados em superfície. Recentemente, alguns sensores orbitais vêm produzindo dados que também permitem caracterizar a atmosfera, como os fornecidos pelo sensor MODIS. Neste artigo, valores de Fator de Reflectância Bidirecional de superfície (FRBs) determinados em campo foram comparados com aqueles calculados a partir de imagens TM/Landsat-5 através de modelos de transferência radiativa (MTRs), sendo que os dados de entrada destes modelos referentes à caracterização da atmosfera foram estimados a partir do emprego de um fotômetro solar CIMEL e de produtos atmosféricos MODIS. Os resultados demonstraram que os dados MODIS são aplicáveis na conversão de dados orbitais para valores de FRBs.

Palavras-chave: correção atmosférica, fotômetro solar, MODIS.

INTRODUÇÃO

Dados de sensoriamento remoto orbital têm sido extensivamente utilizados em estudos relacionados à agricultura, prospecção geológica, manejo florestal, estimativa de biomassa, recursos hídricos e em outras aplicações. Várias dessas aplicações incluem a caracterização espectral de diferentes alvos e o estabelecimento de correlações entre dados radiométricos e dados biofísicos ou geofísicos, os quais são baseados em grandezas radiométricas como os Fatores de Reflectância Bidirecional de superfície (FRBs), cujos cálculos incluem correções atmosféricas.

Existem, basicamente, duas abordagens principais para a correção atmosférica de dados orbitais. Uma é baseada em dados obtidos na própria imagem, como o método comumente denominado *Dark Object Subtraction* (DOS) descrito por Chavez (1988). A outra é baseada em modelos de transferência radiativa (MTRs), cujos dados de entrada são determinados mediante a "caracterização atmosférica", que pode ser realizada com dados coletados em campo por balões meteorológicos ou por plataformas específicas posicionadas de maneira conveniente na superfície, situação esta que raramente ocorre.

Em situações favoráveis, propriedades atmosféricas tais como a profundidade óptica de aerossóis, visibilidade e a coluna de vapor d'água podem ser estimadas a partir da própria imagem (Rochford et al., 2005), mas a situação mais comum é estimá-las a partir de medidas independentes, obtidas por radiômetros espectrais posicionados na superfície da Terra, como por exemplo, o fotômetro solar CIMEL (Ponzoni et al., 2004). Mais recentemente, o acesso a "produtos atmosféricos", tais como os fornecidos pelo sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) disponível nas plataformas orbitais Terra e Aqua, tem se constituído em uma nova possibilidade de fonte de dados para estimativa dos dados utilizados nos MTRs. Apesar disso e considerando as características dinâmicas da atmosfera ao longo de curtos espaços de tempo, essa nova possibilidade carece ainda de maior e mais profunda avaliação, uma vez que a disponibilidade de dados atmosféricos do sensor MODIS raramente será referente às mesmas condições atmosféricas no momento de aquisição dos dados do sensor cujos dados se pretende corrigir. Apesar disso, a viabilidade de utilização dos dados atmosféricos MODIS com essa permitiria maior agilidade em conversões de dados orbitais para valores físicos, bem como facilitaria as missões de calibração absoluta destes mesmos dados.

O objetivo deste artigo é avaliar a possibilidade de aplicação dos produtos atmosféricos MODIS na caracterização da atmos-

fera visando a correção atmosférica de dados orbitais. Para tanto, foram comparados valores de FRBs obtidos experimentalmente em campo com aqueles estimados através de MTRs, baseados na utilização de imagens do sensor TM/Landsat-5 e de dados atmosféricos fornecidos pelo MODIS e pelo fotômetro solar CIMEL.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e trabalho de campo

A área de estudo está situada no município de Pirassununga, SP, entre as coordenadas 22°3'S, 47°21'W e 22°5'S, 47°19'W, a uma altitude aproximada de 610m e refere-se a uma pastagem com dimensões aproximadas de 360m × 290m (104.400m²) e com relevo plano.

O trabalho de campo foi realizado em 20 de junho de 2007, data coincidente com a passagem do satélite Landsat-5, no qual dois tipos de medidas radiométricas foram obtidos: (i) FRBs da pastagem mediante a utilização do espectrorradiômetro FieldSpec PRO (ver Fig. 1), que atua na faixa espectral compreendida de 350 a 2500nm com amostragens espectrais de 1nm e uma placa de referência Spectralon 11, com o objetivo de determinar valores de FRB da pastagem e (ii) irradiância solar direta, utilizando um fotômetro solar CE317/CIMEL atuante nas bandas espectrais: B1 (1010-1030nm), B2 (860-880nm), B3 (660-680nm), B4 (430-450nm) e B5 (926-946nm).

As medidas radiométricas destinadas ao cálculo dos valores de FRBs foram realizadas entre 09h30 e 10h30, em 66 pontos distintos no terreno, distanciados entre si de 30m (aproximadamente) e localizados em campo com receptor GPS (Fig. 1). Os dados GPS serviram para a identificação espacial dos pixels correspondentes nas imagens do sensor TM/Landsat-5, após a realização das correções atmosféricas. Os valores de FRBs das 66 amostras foram utilizados para o cálculo dos valores de FRB médio nas faixas espectrais das bandas do sensor TM/Landsat-5: B1 (452-518nm), B2 (529-610nm), B3 (624-693nm), B4 (776-905nm), B5 (1568-1784nm) e B7 (2097-2347nm). Os FRBs médios foram calculados a partir de uma média aritmética ponderada, na qual os pesos utilizados foram as respostas espectrais relativas das bandas do TM/Landsat-5 (Brown et al., 2005).

Foram realizadas 53 medidas de irradiância solar direta com o fotômetro solar CIMEL posicionado na área de estudo, em intervalos de 10min, com início das medidas ao nascer do Sol, estendendo-se durante o período de passagem do satélite, e com término ao pôr do Sol. Essas medidas foram utilizadas posteriormente na caracterização atmosférica segundo metodologia descrita em detalhes por Ponzoni et al. (2004).

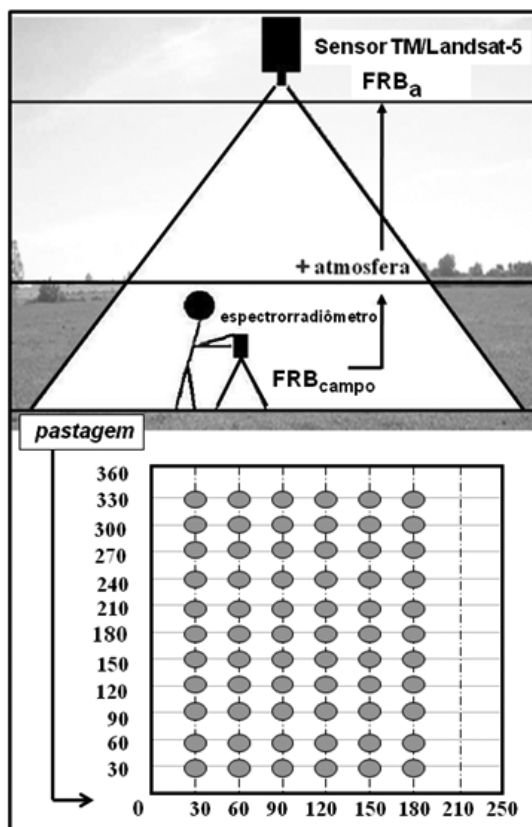


Figura 1 – Representação esquemática adotada durante coleta de dados em campo: os círculos cinzentos indicam as localizações das medidas na pastagem.

Seleção de produtos MODIS

O sensor MODIS/Terra está a 705km de altitude e adquire imagens com largura de faixa de 2.330km. De maneira geral, pode-se considerar que as aquisições deste sensor ocorrem diariamente em latitudes superiores a 30° e a cada dois dias em latitudes inferiores a 30°. O sensor possui resolução radiométrica de 12 bits e 36 bandas espectrais posicionadas na faixa de 407-14385nm, com resoluções espaciais que vão de 250 a 1000m. Das 36 bandas espectrais, 26 coletam dados que são processados em algoritmos específicos para a geração de produtos atmosféricos (King et al., 2003).

Para a caracterização atmosférica a partir dos produtos atmosféricos MODIS, verificou-se a disponibilidade de apenas duas aquisições de uso potencial realizadas pela plataforma Terra, ambas com defasagem temporal de 1 dia, sendo esta a menor defasagem disponível com relação à aquisição TM/Landsat-5. Para efeito de escolha da aquisição MODIS/Terra mais adequada entre as duas disponíveis, foram utilizadas informações das condições meteorológicas nas datas de passagem dos satélites sobre a área de estudo (Tab. 1) e das geometrias de aquisição envolvidas (Tab. 2).

Os dados meteorológicos foram obtidos por uma estação próxima à área de estudo que é mantida pela Universidade de São Paulo (USP) e está posicionada nas coordenadas 21°59’S e 47°26’W, a 630m acima do nível médio do mar.

Durante as aquisições orbitais, as condições climáticas na região foram de céu limpo, livre de nuvens. Se a atmosfera nas duas datas for considerada plano-paralela, por aproximação, a transmitância espectral total de radiação ($T_{total(\lambda)}$) em cada aquisição pode ser calculada em função de duas grandezas, como demonstra a Eq. (1) proposta por Gaut et al. (1975).

$$T_{total(\lambda)} = e^{-\tau_{total(\lambda)} \times m} \tag{1}$$

onde $\tau_{total(\lambda)}$ é a profundidade óptica espectral total, resultante dos efeitos de absorção por gases e espalhamento atmosférico (aproximação) e m representa a massa óptica de ar atmosférica relativa atravessada pela radiação ($m = sec(\theta)$), dependente unicamente do ângulo zenital solar (para o trajeto Sol-alvo) e do ângulo zenital do sensor (no trajeto alvo-sensor).

A precipitação e a umidade relativa são parâmetros influentes na carga e no diâmetro médio de aerossóis, respectivamente (Lozano et al., 2001), ambos capazes de alterar as características de profundidade óptica espectral total $\tau_{total(\lambda)}$. A Tabela 1 indica que não houve precipitação nas datas de aquisição, sugerindo pouca alteração na carga de aerossóis. Além disso, observa-se que os valores de umidade relativa instantâneos registrados nas datas das aquisições MODIS, quando comparados àqueles da aquisição TM do dia 20/06, apresentam diferenças relativas de 7,9%, com relação à aquisição MODIS do dia 19/06, e de 4,5%, com relação à aquisição MODIS do dia 21/06. Estes fatos revelam que os valores de umidade relativa foram similares entre si, favorecendo concluir sobre semelhanças do diâmetro médio de aerossóis.

As medidas de pressão média em superfície foram similares, com diferenças relativas inferiores a 0,1% entre a aquisição TM e as aquisições MODIS, sugerindo estabilidade atmosférica no período. As semelhanças nas temperaturas e irradiancias solares na superfície e seus respectivos horários de ocorrência reforçam a similaridade das características de absorção e espalhamento atmosféricas dessas aquisições. Dessa forma, pela análise dos parâmetros atmosféricos considerados, concluiu-se que seria razoável considerar que as condições de espalhamento e absorção atmosféricas na aquisição da imagem TM/Landsat-5 foram similares às condições encontradas nas duas aquisições MODIS/Terra, potencializando a utilização dos dados deste sensor no trabalho.

Tabela 1 – Dados meteorológicos nas datas de aquisição.

Aquisição (Data)	TM/Landsat-5 (20/06/2007) ⁽¹⁾	MODIS/Terra (19/06/2007) ⁽¹⁾	MODIS/Terra (21/06/2007) ⁽¹⁾
Precipitação Total (mm)	0	0	0
Umidade Relativa Instantânea (%) ⁽³⁾	66,84	61,55	69,87
Pressão Média em Superfície (hPa)	950,70	949,86	951,03
Temperatura Mínima (°C)	10,19 (07h10) ⁽²⁾	12,64 (23h10) ⁽²⁾	9,94 (06h20) ⁽²⁾
Temperatura Máxima (°C)	26,22 (15h20) ⁽²⁾	26,98 (15h00) ⁽²⁾	26,23 (15h20) ⁽²⁾
Temperatura Média (°C)	17,16	19,33	16,71
Irradiância Solar Máxima na Superfície (W/m ²)	669,9 (12h30) ⁽²⁾	682,5 (12h10) ⁽²⁾	675,7 (12h50) ⁽²⁾

⁽¹⁾Datas de aquisição. As aquisições MODIS/Terra são defasadas de 1 dia em relação às TM/Landsat-5. ⁽²⁾Horário em que o evento ocorreu. ⁽³⁾Dados instantâneos. Referem-se ao horário de passagem do sensor TM/Landsat-5 sobre o local.

Tabela 2 – Parâmetros de geometria de aquisição dos dados disponíveis.

Aquisição (Data)	TM/Landsat-5 (20/06/2007)	MODIS/Terra (19/06/2007)	MODIS/Terra (21/06/2007)
Horário Local	13h04	13h30	13h20
θ_z ⁽¹⁾ (graus)	54,16	51,28	52,77
$m_{r,z}$ ⁽²⁾	1,71	1,60	1,65
θ_v ⁽¹⁾ (graus)	0	17,90	9,24
$m_{r,v}$ ⁽²⁾	1	1,05	1,01

⁽¹⁾ θ_s e θ_v representam os ângulos zenitais do Sol e do sensor, respectivamente. Os ângulos zenitais MODIS/Terra referem-se à célula de interesse. ⁽²⁾ $m_{r,z}$ e $m_{r,v}$ as massas ópticas de ar atmosférica relativas referentes ao trajeto Sol-alvo e alvo-sensor, respectivamente.

Com a disponibilidade de dados MODIS/Terra, a escolha da passagem mais adequada para a caracterização atmosférica da aquisição TM/Landsat-5 seguiu-se com o estudo da similaridade de alguns parâmetros relacionados às geometrias de aquisição desses sensores, apresentados na Tabela 2. Considerando os valores de $\tau_{total(\lambda)}$ similares entre as diferentes aquisições (investigação anterior), depreende-se da Eq. (1) que se os valores de m também forem próximos entre si, as transmitâncias poderão ser consideradas similares. Essa interpretação induziu à escolha dos dados MODIS/Terra de 21 de junho 2007, já que os valores de m dessa aquisição são mais próximos aos da situação de aquisição TM/Landsat-5.

Preparação das imagens TM/Landsat-5

O sensor TM/Landsat-5 opera a 705km de altitude e adquire imagens com largura de 185km, sendo que sua resolução temporal é de 16 dias. O sensor possui resolução radiométrica de 8 bits

e sete bandas espectrais posicionadas na faixa de 452-12500nm, com resoluções espaciais que vão de 30 a 120m.

As imagens TM/Landsat-5 utilizadas neste trabalho sofreram duas etapas de preparação: (i) georreferenciamento com dados obtidos em campo com receptor GPS e (ii) transformação das imagens originais (ND) em imagens de Fator de Reflectância Bidirecional aparente (FRBa), realizada com a metodologia descrita em Chander & Markham (2003).

Por caracterização atmosférica nas faixas espectrais das bandas TM/Landsat-5 entendeu-se a determinação de três parâmetros atmosféricos: visibilidade (VIS, km), conteúdo de vapor d'água (U_{H_2O} , g/cm²) e conteúdo de ozônio (U_{O_3} , cm-atm). A escolha do parâmetro VIS (relacionado à carga de aerossóis) justifica-se por sua presença na maioria dos algoritmos existentes de correção atmosférica e por ser mais intuitivo para a maioria dos usuários.

Caracterizações atmosféricas

Duas alternativas distintas de caracterização atmosférica foram testadas: (i) a partir de dados do fotômetro solar CIMEL e (ii) a partir de dados MODIS. Os produtos dessas caracterizações foram submetidos ao processamento dos MTRs para a efetivação das correções atmosféricas das imagens TM/Landsat-5 convertidas para FRBa.

Na caracterização atmosférica com o fotômetro solar CIMEL, os valores de irradiância solar obtidos em campo foram utilizados em três procedimentos: (i) calibração do CIMEL pelo método de Langley (Ponzoni et al., 2004); (ii) uso dos parâmetros de Ångström (1929) e da Eq. (2) de transmitância de vapor d'água proposta por Zullo Jr. et al. (1996) na determinação do valor de

U_{H_2O} e (iii) uso dos parâmetros da Eq. (3) de Ångström (1929) e da Eq. (4) proposta por Deschamps et al. (1981) na determinação da VIS.

$$T_{H_2O(\lambda)} = e^{-0,6767 \times (U_{H_2O})^{0,5093} \times (m)^{0,5175}} \quad (2)$$

O fotômetro solar utilizado não possui bandas espectrais capazes de oferecer estimativas acuradas de U_{O_3} . Dessa forma, esse parâmetro foi estimado a partir de um modelo atmosférico tropical, com valor de $U_{O_3} = 0,270 \text{ cm-atm}$. A caracterização obtida com o fotômetro solar CIMEL, os parâmetros da Eq. (3) proposta por Ångström e os valores de R^2 referentes ao ajuste desta equação são apresentados na Figura 2.

$$\tau_{a(\lambda)} = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (3)$$

onde, $\tau_{a(\lambda)}$ é a profundidade óptica espectral de aerossóis, β é o parâmetro de turbidez de Ångström, relacionado à quantidade de aerossóis e α o expoente de Ångström, relacionado à distribuição média de tamanhos dos aerossóis presentes.

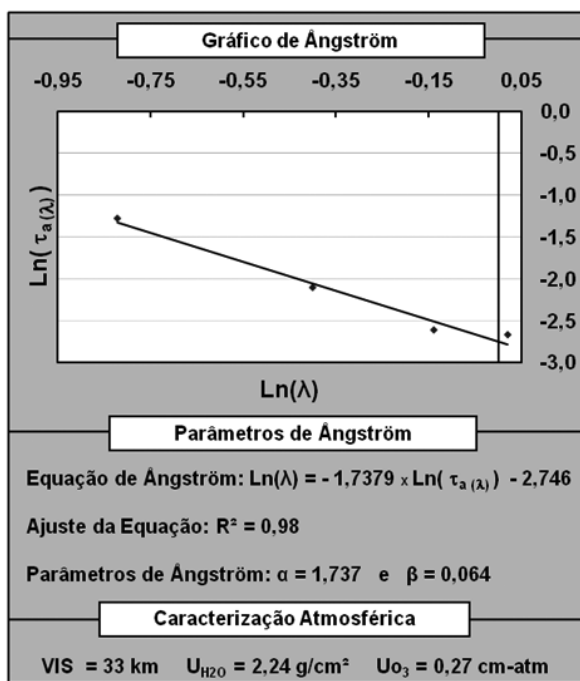


Figura 2 – Caracterização atmosférica com fotômetro solar CE317/CIMEL.

Na caracterização atmosférica com dados MODIS, os produtos selecionados foram submetidos a duas etapas de preparação: (i) georreferenciamento com dados de posicionamento que acompanham esses produtos e (ii) transformação dos números digitais originais (ND) nas unidades físicas de uso convencional

em MTRs, realizada com a aplicação dos fatores de escala disponibilizados nos produtos atmosféricos. É importante salientar que esses produtos são gerados por algoritmos específicos, empregando-se imagens MODIS. São constituídos por camadas, as quais representam parâmetros atmosféricos (Tab. 3). Os produtos são disponibilizados gratuitamente aos usuários pelo *God-dard Space Flight Center* (NASA, 2007).

O procedimento de caracterização atmosférica utilizando esses produtos foi organizado em três passos: (i) extração dos valores de profundidade óptica espectral de aerossóis $\tau_{a(\lambda)}$ nas bandas 470nm, 550nm, 660nm e 2130nm para determinação da VIS, (ii) obtenção do valor de U_{H_2O} e (iii) obtenção do valor de U_{O_3} . Para a extração dos valores de $\tau_{a(\lambda)}$, U_{H_2O} e U_{O_3} , as coordenadas da área de estudo foram utilizadas na determinação das células de interesse nas diferentes camadas, considerando a diversidade de resoluções espaciais existentes (ver Tab. 3).

As recuperações de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS foram empregadas na determinação da visibilidade, utilizando-se novamente (como na caracterização CIMEL) a fórmula de turbidez Ångström (1929) e a Eq. (4) de visibilidade de Deschamps et al. (1981). Assim, o valor de VIS foi determinado, encerrando-se o primeiro passo (i).

$$\beta = 0,613 \cdot e^{-VIS/15} \quad (4)$$

As obtenções dos valores de U_{H_2O} (passo ii) e U_{O_3} (passo iii) foram realizadas a partir da extração de valores das células de interesse identificadas nesses produtos. Em algumas situações, os usuários encontrarão células de interesse com valores espúrios, como por exemplo, valores negativos de $\tau_{a(\lambda)}$. Uma possível solução para esse caso é a extração da média aritmética de uma janela centrada na célula de interesse. Essa janela deve ser preferencialmente delimitada pelo produto mais sujeito à variabilidade espacial. Conforme sugerem Liang et al. (2001), frequentemente a maior heterogeneidade na distribuição espacial ocorre com aerossóis. Neste trabalho essa alternativa também foi avaliada. Para tanto, conforme recomendações de Ichoku et al. (2002), uma janela de $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ (Fig. 3) foi delimitada em todas as camadas utilizadas e médias aritméticas para os produtos de $\tau_{a(\lambda)}$, U_{H_2O} e U_{O_3} foram calculadas utilizando-se as células com valores positivos (em cinza, Fig. 3) encerradas por essa janela. Essas médias também foram utilizadas para caracterizar a atmosfera, seguindo-se os mesmos três passos descritos anteriormente na extração de valores pela célula de interesse.

Dessa forma, seriam obtidas duas caracterizações distintas com os dados MODIS: uma resultante dos valores extraídos da célula de interesse e outra a partir dos valores calculados com as médias aritméticas nas janelas. Todavia, como informa a Tabela 3,

Tabela 3 – Produtos MODIS/Terra⁽¹⁾.

Produto MODIS* (Parâmetro)	Nome da camada (Resolução Espacial)
MOD04 ($\tau_{a(\lambda)}$)	<i>AOT at 0,55 micron with best quality data (10 km)</i>
	<i>Corrected optical thickness at 0,47, 0,55 e 0,66 micron (10 km)</i>
	<i>Corrected optical thickness at 2,13 micron (10 km)</i>
MOD05 (U_{H_2O})	<i>Total Column Precipitable Water Vapor NIR (1 km)</i>
	<i>Total Column Precipitable Water Vapor IR (5 km)</i>
MOD07 (U_{O_3})	<i>Total Ozone Burden (5 km)</i>

(1) Todos os produtos utilizados foram gerados pela coleção C005-L de algoritmos.

MODIS (Janela 50km x 50km)

$\tau_a(470nm)$ - Média: 0,015

0,000	-0,011	0,028	-0,022	-0,023
-0,012	-0,017	-0,017	-0,016	-0,018
-0,022	0,001	0,002	-0,040	-0,040
-0,005	0,024	0,015	-0,023	-0,031
-0,011	0,027	0,005	-0,008	-0,060

$\tau_a(550nm)$ - Média: 0,013

0,000	-0,008	0,025	-0,016	-0,016
-0,009	-0,012	-0,012	-0,012	-0,013
-0,019	0,001	0,002	-0,036	-0,036
-0,003	0,021	0,013	-0,021	-0,028
-0,008	0,024	0,004	-0,006	-0,047

$\tau_a(660nm)$ - Média: 0,012

0,000	-0,006	0,022	-0,012	-0,012
-0,006	-0,009	-0,009	-0,009	-0,009
-0,017	0,001	0,001	-0,033	-0,033
-0,002	0,019	0,012	-0,019	-0,025
-0,005	0,022	0,004	-0,004	-0,038

$\tau_a(2130nm)$ - Média: 0,009

0,000	-0,001	0,018	-0,002	-0,002
-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
-0,014	0,001	0,001	-0,026	-0,026
0,000	0,015	0,009	-0,015	-0,020
-0,001	0,017	0,003	0,000	-0,017

Figura 3 – Janela 50km x 50km representada nos produtos $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS: a localização da pastagem é sinalizada com um círculo preto na célula de interesse.

o produto MOD05 oferece duas alternativas de recuperação de vapor d'água. Uma utiliza bandas situadas no NIR (865nm, 1240nm, 905nm, 936nm e 940nm, infravermelho próximo) e a outra utiliza bandas situadas no IR (6715nm, 7315nm e 8550nm, infravermelho termal). Essas duas alternativas foram avaliadas, compondo caracterizações atmosféricas diferentes.

Por fim, foram obtidas quatro caracterizações atmosféricas MODIS distintas: (i) duas caracterizações para valores extraídos da célula de interesse: uma utilizando o vapor d'água recuperado pelas bandas NIR e outra pelas bandas IR; e (ii) duas outras resultantes da extração de valores por média na janela:

analogamente ao caso anterior, uma utiliza o vapor d'água recuperado pelas bandas NIR e outra pelas bandas IR. Essas caracterizações, os parâmetros da equação de Ångström (1929) e os valores de R^2 referentes ao ajuste da equação são listados na Tabela 4.

Com as caracterizações determinadas, para efeito das correções atmosféricas das imagens TM/Landsat-5 convertidas para valores de FRBa (bandas 1-5 e 7), foram testados dois MTRs distintos: (i) *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (5S) (Tanré et al., 1990) por intermédio do aplicativo SCORADIS (Zullo Jr., 1994) e (ii) MODerate resolution atmospheric

Tabela 4 – Caracterizações atmosféricas com MODIS/Terra.

Caracterização Atmosférica	VIS (km)	R ²	α	β	U _{H2O} (g/cm ²)	U _{O3} (cm-atm)
MODIS/CIR ⁽¹⁾	93	0,49	0,411	0,001	1,71	0,265
MODIS/CNIR	93	0,49	0,411	0,001	2,00	0,265
MODIS/JIR	60	0,91	0,288	0,011	1,67	0,263
MODIS/JNIR ⁽²⁾	60	0,91	0,288	0,011	1,84	0,263

⁽¹⁾MODIS/CIR é a caracterização MODIS obtida com os valores extraídos da “Célula” de interesse, utilizando a recuperação de vapor d’água das bandas IR. ⁽²⁾MODIS/JNIR é a caracterização obtida com os valores de média extraídos a partir da janela de 50km × 50km, utilizando a recuperação de vapor d’água das bandas NIR.

TRANsmiSSion 4 (MODTRAN4) (Berk et al., 1998) por intermédio do aplicativo FLAASH (Anderson et al., 1999).

Comparação entre valores de FRB estimados com aqueles determinados em campo

Com o intuito de comparar preliminarmente os valores de FRBs calculados a partir das correções atmosféricas das imagens TM/Landsat-5 com aqueles determinados em campo, foram elaborados gráficos utilizando os valores médios calculados com as 66 amostras (procedimento descrito anteriormente), onde são representados também os desvios padrões em torno dessas médias (Fig. 4). Como os resultados gráficos para as caracterizações MODIS IR e NIR foram equivalentes, na Figura 4 são apresentados somente os gráficos NIR.

Com o intuito de analisar mais detalhadamente as diferenças existentes entre as caracterizações atmosféricas testadas, foi calculada a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio Percentual (RQEQM%) nas bandas espectrais TM/Landsat-5 (ver Fig. 5). Essa estatística é obtida por intermédio da Eq. (5).

$$RQEQM\% = \frac{RQEQM(\lambda)}{FRB_{campo(\lambda)}} \times 100 \quad (5)$$

onde $RQEQM(\lambda)$ é o valor obtido para a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio na banda espectral considerada, tomando-se como referência os valores médios de FRB_s obtidos em campo; e $FRB_{campo(\lambda)}$ o respectivo valor médio de FRB obtido em campo com o espectrorradiômetro.

O ozônio atmosférico atua absorvendo radiação eletromagnética (REM) na faixa espectral do visível (Flittner et al., 1993). É um componente pouco variável no espaço e no tempo (Liang et al., 2001), realidade que permite a criação de modelos que explicam, com algum grau de fidelidade, suas variações, como o modelo atmosférico tropical utilizado aqui na caracterização atmosférica com fotômetro solar CE317/CIMEL.

A Tabela 5 apresenta um estudo de impacto das alterações de U_{O3}, levando em consideração os valores mais distintos encontrados nas caracterizações atmosféricas analisadas aqui (U_{O3} = 0,264cm-atm e U_{O3} = 0,270cm-atm), fixando-se os mesmos valores de VIS e U_{H2O}.

Tabela 5 – Impactos das alterações na concentração de Ozônio (U_{O3})⁽¹⁾.

Banda	FRB _(médio) ⁽¹⁾		Diferenças
	U _{O3} = 0,263 _(cm-atm)	U _{O3} = 0,270 _(cm-atm)	
TM1	0,0280	0,0279	-0,00008
TM2	0,0725	0,0722	-0,00030
TM3	0,0798	0,0797	-0,00015

⁽¹⁾Valores determinados com o aplicativo SCORADIS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, a Figura 4 indicou que os FRBs estimados via correção atmosférica de imagens do sensor TM/Landsat-5 foram inferiores àqueles obtidos em campo com o espectrorradiômetro. Não obstante, as curvas de FRBs apresentadas sugerem conformidade espectral entre os dados obtidos em campo e aqueles calculados pelas caracterizações atmosféricas testadas. A única exceção observada é a da banda espectral TM5 ($\lambda_c = 1676,0nm$), cujas estimativas de FRB foram mais subestimadas: os FRBs foram inferiores aos estimados na banda TM4 ($\lambda_c = 840,5nm$), comportamento distinto daquele observado em campo. Os desvios padrões foram maiores nas curvas de FRBs obtidas em campo, quando comparados àqueles determinados a partir dos valores de FRB calculados com a aplicação dos MTRs via dados do fotômetro solar CIMEL ou do MODIS. Esse resultado é consequência da menor resolução espacial do sensor TM/Landsat-5 e de sua menor sensibilidade radiométrica, em comparação ao espectrorradiômetro FieldSpec PRO. Aliado a isso, é necessário salientar que após a realização

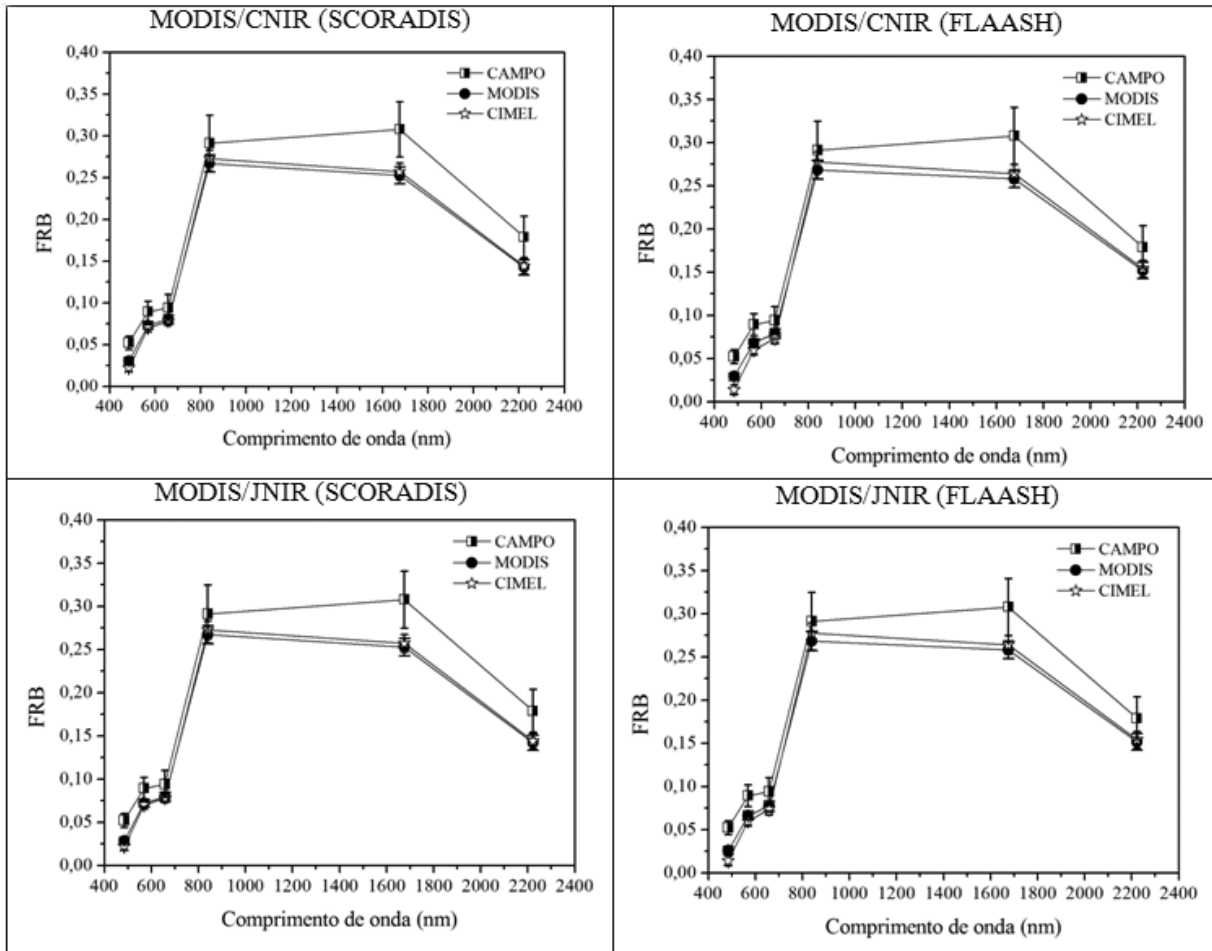


Figura 4 – Curvas de FRB. Ao topo de cada gráfico consta a caracterização MODIS empregada e, entre parênteses, o respectivo MTR utilizado.

de correções atmosféricas, parte dos efeitos de espalhamento atmosférico persiste, suavizando diferenças entre os valores de FRB (Tanré et al., 1979).

Analisando-se os RQEQM% obtidos para cada banda espectral TM (Fig. 5), depreende-se que os MTRs ofereceram FRBs coerentes entre si nas cinco caracterizações atmosféricas testadas.

Como demonstram os resultados contidos na Tabela 5, as alterações de U_{O_3} implicaram em diferenças muito pequenas nos valores de FRBs nas bandas situadas no visível: TM1 ($\lambda_c = 485,0\text{nm}$), TM2 ($\lambda_c = 569,5\text{nm}$) e TM3 ($\lambda_c = 658,5\text{nm}$). Dessa forma, é razoável considerar a igualdade dos valores de ozônio obtidos em cada caracterização atmosférica.

Segundo Liang et al. (2001) os efeitos de espalhamento múltiplo por aerossóis intensificam sobremaneira a contaminação por adjacência, suavizando as diferenças existentes entre pixels.

Kaufman (1993) salienta que as maiores influências por espalhamento de aerossóis ocorrem em comprimentos de onda menores do visível. Nesse sentido, em todas as correções atmosféricas realizadas, a Figura 4 mostra acentuada redução nos desvios padrões da banda espectral TM3 em relação à TM1, assinalando intensificação dos efeitos de suavização com a diminuição do comprimento de onda. Somado a isso, os valores de RQEQM% obtidos indicaram que, na faixa espectral do visível, as maiores diferenças entre a referência de campo e as correções atmosféricas sempre ocorreram na banda espectral TM1 (Fig. 5). Portanto, essa banda espectral foi utilizada para análise dos valores de visibilidade sugeridos nas diferentes caracterizações. Os valores de RQEQM% (Fig. 5) indicaram então que os melhores resultados na faixa espectral do visível foram obtidos com as quatro caracterizações MODIS, sobretudo as de atmosfera mais transparentes (93km).

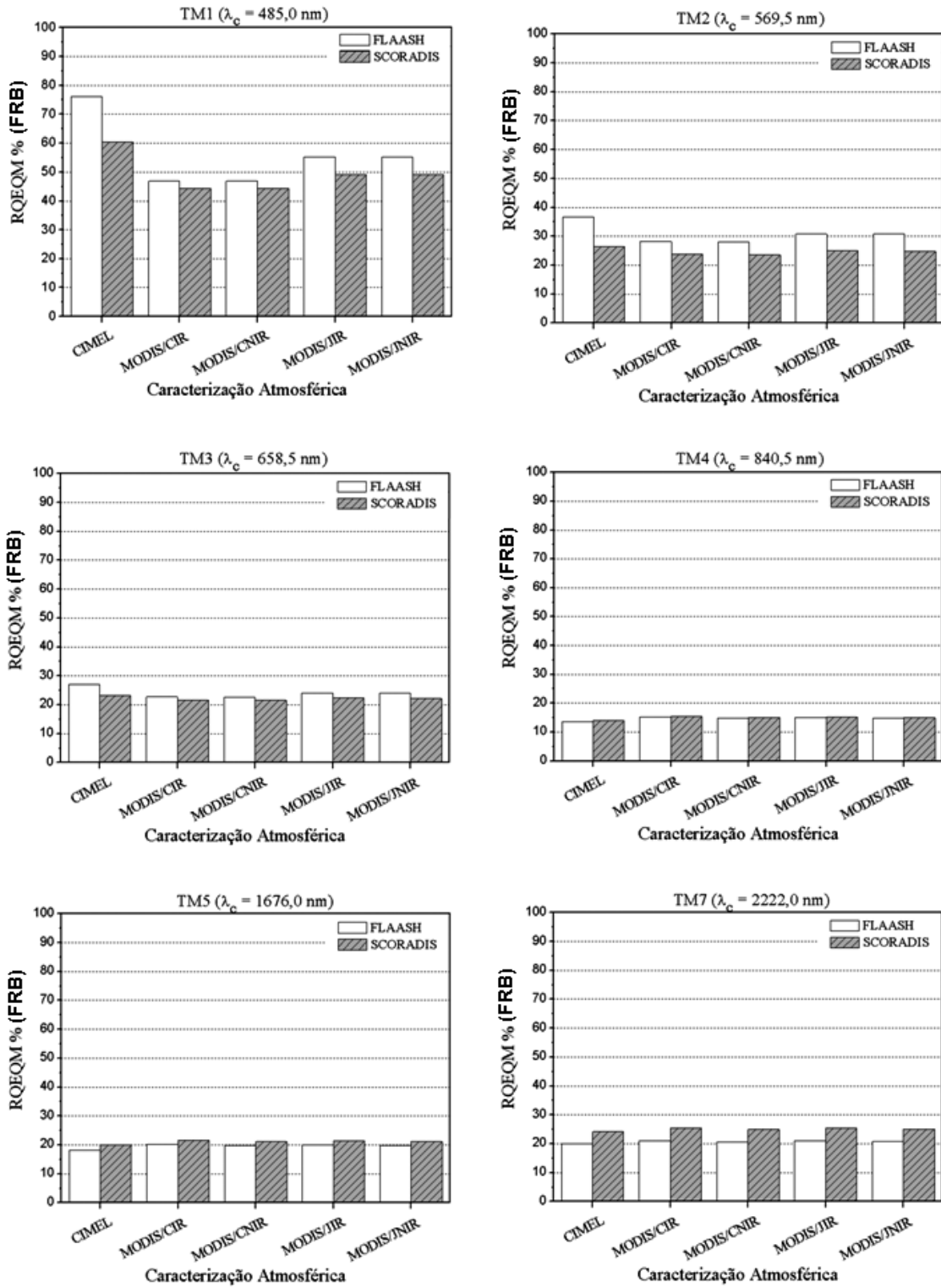


Figura 5 – Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio Percentual (RQEQM%).

Segundo Levy (2007), distribuições de tamanho de aerossóis dominadas por aerossóis de moda fina possuem $\alpha \geq 1,6$ e distribuições dominadas por moda grossa possuem $\alpha \leq 0,6$. Iqbal (1983) salienta que na prática, globalmente, os aerossóis encontrados têm α entre 0,5 e 2,5. Observa-se (Fig. 2) que o fotômetro solar CIMEL recuperou um expoente de Ångström coerente (1,737), recaindo nos intervalos previstos em literatura. Por outro lado, os expoentes de Ångström calculados com os dados MODIS (Tab. 4) ofereceram valores muito distantes dos encontrados com o fotômetro solar CIMEL. Esses valores foram inferiores a 0,3 e remetem a um aerossol de diâmetro extremamente grosseiro, realidade distinta dos intervalos práticos previstos em literatura e da aquisição em questão. Esses resultados refletem que os dados de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS recuperados estão fortemente sujeitos a incertezas distintas ao longo do espectro, cujas principais fontes citadas em literatura são: (i) a *Signal Noise to Ratio* (SNR) das bandas espectrais chegam a variar 46% (Remer et al., 2006); (ii) o modelo de aerossóis assumido pelo algoritmo de recuperação MODIS não é igualmente apropriado em todas as faixas espectrais e (iii) as metodologias de determinação do sinal proveniente da superfície e dos aerossóis. Conforme Iqbal (1983), sob condição de visibilidade elevada, as diferenças de transmitância ao longo do espectro são relativamente menores quando comparadas às outras situações de turbidez porventura existentes. Dessa forma, a susceptibilidade às incertezas existentes ao longo do espectro aumenta, o que justifica neste trabalho as distorções nas estimativas de expoentes de Ångström utilizando-se dados de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS.

O fotômetro solar CIMEL revelou que a situação de aquisição foi de alta visibilidade (Fig. 2), com um valor de parâmetro de turbidez pequeno ($\beta = 0,064$). Os valores de β obtidos nas quatro caracterizações realizadas com os dados de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS (Tab. 4) foram inferiores aos recuperados com o fotômetro solar CIMEL, contudo, também refletiram uma situação de alta visibilidade. É perceptível, ainda, que o valor β obtido com a média extraída da janela MODIS de $50\text{km} \times 50\text{km}$ foi o que mais se aproximou daquele recuperado com o fotômetro solar CIMEL.

Segundo Remer et al. (2006), os valores de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS existentes em cada célula são determinados pelo algoritmo sobre uma população de pixels grande (400 pixels de 500m), fato que reduz substancialmente as incertezas citadas anteriormente. Aqui, é possível observar que as caracterizações atmosféricas MODIS que utilizaram a média extraída a partir da janela de $50\text{km} \times 50\text{km}$ (MODIS/JIR e MODIS/JNIR, Tab. 4) ofereceram melhores ajustes à equação de Ångström e valores de β e VIS mais próximos ao do fotômetro solar CIMEL. Isso se deve, possivelmente, pela redução

de incertezas, já que a média, extraída de uma janela de $50\text{km} \times 50\text{km}$, se refere a uma área muito maior que a da célula de interesse. Esses resultados sugerem que, havendo controle adequado, as recuperações de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS, realizadas sobre grandes áreas, podem levar a valores de VIS da ordem daqueles estimados em campo com fotômetro solar já que, também neste último caso, as recuperações estão sujeitas a algumas incertezas: (i) ligadas à calibração do equipamento; (ii) à pressuposição de que a atmosfera é estável temporalmente e horizontalmente homogênea durante a coleta de dados e (iii) a erros durante a obtenção de medidas, principalmente devido à contaminação por nuvens e por apontamento imperfeito na direção do Sol.

Considerando que a maior intensidade do espalhamento de REM por aerossóis raramente ocorre exatamente na direção alvo-sensor (funções fase de espalhamento assimétricas), recomenda-se a realização de estudos mais específicos de geometria de aquisição para a determinação da VIS, que não contemplem somente a massa óptica de ar atmosférica relativa atravessada pela REM. Isso pode melhorar as estimativas de FRBs, principalmente na faixa espectral do visível.

Vermote & Vermeulen (1999) demonstraram que a banda TM4 recebe influências atmosféricas de: (i) absorção por vapor d'água e (ii) espalhamento de aerossóis (considerando-se um modelo de aerossóis continental). Neste último caso, o fotômetro solar CIMEL recuperou $\alpha > 1,6$ (Fig. 2). Isso indica, conforme Levy (2007), que na aquisição TM/Landsat-5 os aerossóis eram dominados por moda fina, fato este que reduz substancialmente as influências por aerossóis na faixa espectral da TM4, reduzindo-se também as incertezas nas estimativas de FRB. Salienta-se, ainda, que quando os alvos considerados forem intensamente brilhantes na faixa espectral em estudo, os erros percentuais cometidos no processo de correção atmosférica se mostrarão substancialmente inferiores. Este fato ocorreu aqui, já que a pastagem utilizada é brilhante na banda espectral TM4 (ver Fig. 4), resultando nos menores RQEQM% encontrados neste estudo (inferiores a 16%), ver Figura 5. Ademais, também na banda espectral TM4 é que foram encontradas as menores diferenças entre os RQEQM% da caracterização atmosférica CIMEL e das caracterizações atmosféricas MODIS (ver Fig. 5).

Nas bandas TM5 e TM7 ($\lambda_c = 2222,0\text{nm}$), as maiores influências atmosféricas são resultantes da absorção por vapor d'água. Assim, é viável utilizar essas bandas espectrais para análise das recuperações de vapor d'água com relação a cada caracterização atmosférica.

Considerando o amplo campo de visada, os produtos MODIS são constituídos por células onde, cada uma, representa

uma área distinta do terreno e detém uma condição de aquisição peculiar. Como discutido anteriormente, as recuperações MODIS de vapor d'água utilizadas aqui (bandas NIR e IR) foram extraídas da aquisição que apresentava condições de massa óptica de ar atmosférica relativa mais próximas da aquisição TM/Landsat-5. A recuperação que utiliza bandas espectrais do NIR possui resolução espacial superior (1km) contra os 5km das recuperações do IR. Seemann et al. (2003) e King et al. (2003) confrontaram as recuperações do IR com recuperações mais acuradas obtidas com radiômetros de microondas e encontraram RMSE próximos de 0,4g/cm². Gao & Kaufman (2003) realizaram comparações semelhantes com recuperações do NIR e obtiveram RMSE próximos de 0,116g/cm². Neste trabalho, as recuperações realizadas utilizando-se as bandas espectrais do NIR foram mais próximas daquelas obtidas com o fotômetro solar CE317/CIMEL (comparar Fig. 2 e Tab. 4) e ofereceram os menores valores de RQEQM% (ver Fig. 5). Esses resultados corroboram os resultados obtidos pelos autores mencionados anteriormente.

Conforme sugerem as curvas de FRB (Fig. 4), as bandas TM5 e TM7 foram as que forneceram os menores RQEQM% ao longo de todo o espectro considerado (visível, infravermelho próximo e médio) sinalizando que as duas alternativas (fotômetro solar CIMEL e MODIS) foram capazes de recuperar valores coerentes do conteúdo de vapor d'água. Somado a isso, nessas bandas espectrais, ocorreram as maiores similaridades entre os RQEQM% obtidos pela caracterização atmosférica via fotômetro solar CIMEL e as caracterizações via MODIS (ver Fig. 5). Esse resultado evidencia que o MODIS foi capaz de realizar estimativas de vapor d'água similares as do fotômetro solar CIMEL.

CONCLUSÕES

1. As diferentes caracterizações (fotômetro solar CIMEL e MODIS) levaram a valores de FRB razoavelmente próximos entre si em toda a faixa espectral analisada, oferecendo grande conformidade espectral com os FRBs obtidos em campo;
2. Os dados de $\tau_{a(\lambda)}$ MODIS ofereceram estimativas do expoente de Ångström " α " incompatíveis com aquela recuperada pelo fotômetro solar CIMEL para a situação de aquisição estudada. Os valores dos parâmetros de turbidez " β " estimados com dados MODIS foram coerentes à realidade da aquisição, de atmosfera visível;
3. As quatro caracterizações MODIS ofereceram as melhores estimativas de FRBs na faixa espectral do visível (TM1, TM2 e TM3), indicando que o MODIS ofereceu as melhores estimativas do parâmetro VIS;
4. Nas faixas espectrais do infravermelho próximo (TM4) e médio (TM5 e TM7) os valores de FRB estimados com dados MODIS ficaram muito próximos aos obtidos com o fotômetro solar CIMEL. Dessa forma, as estimativas de vapor d'água MODIS demonstraram eficácia de correção dos efeitos de absorção atmosférica idêntica ao fotômetro solar CIMEL. As recuperações de vapor d'água NIR foram mais acuradas;
5. Os produtos atmosféricos MODIS são aplicáveis satisfatoriamente na correção atmosférica de imagens orbitais, desde que existam controles que favoreçam: (i) a representatividade das condições de aquisição da imagem que se deseja corrigir e (ii) a redução de incertezas e as peculiaridades dos diferentes tipos de dados atmosféricos envolvidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus mais sinceros agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos (Mestrado) e à Coordenação Acadêmica do Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo suporte logístico ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON GP, PUKALL B, ALLRED CL, JEONG LS, HOKE M, CHETWYND JH, ADLER-GOLDEN SM, BERK A, BERNSTEIN LS, RICHTSMEIER SC, ACHARYA PK & MATTHEW MW. 1999. FLAASH and MODTRAN4: State-of-the-Art Atmospheric Correction for Hyperspectral data. In: Aerospace Conference, 1999, Aspen. Proceedings. Aspen: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 177–181.
- ÅNGSTRÖM A. 1929. On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11: 156–166.
- BERK A, BERNSTEIN LS, ANDERSON GP, ACHARYA PK, ROBERTSON DC, CHETWYND JH & ADLER-GOLDEN SM. 1998. MODTRAN – Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote Sensing of the Environment*, 65: 367–375.
- BROWN SW, JOHNSON BC, BIGGAR SF, ZALEWSKI EF, COOPER J, HAJEK P, HILDUM E, GRANT P, BARNES RA & BUTLER JJ. 2005. Radiometric validation of NASA's Ames Research Center's Sensor Calibration Laboratory. *Applied Optics*, 44(30): 6426–6443.

- CHANDER G & MARKHAM B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41: 2674–2677.
- CHAVEZ PS. 1988. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459–479.
- DESCHAMPS PY, HERMAN M & TANRÉ D. 1981. Influence de l'atmosphère en télédétection des ressources terrestres. Modélisation et possibilités de correction. In: *Colloque International Signatures Spectrales d'objets en Télédétection*, 1981, Avignon. Proceedings. Versailles: Institut National de la Recherche Agronomique, 543–558.
- FLITTNER DE, HERMAN BM, THOME KJ, SIMPSON JM & REAGAN JA. 1993. Total ozone and aerosol optical depths inferred from radiometric measurements in the Chappuis absorption band. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50: 1113–1121.
- GAO BC & KAUFMAN YJ. 2003. Water vapor retrievals using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D13): 4389–4398.
- GAUT NE, REIFENSTEIN EC & SIEVERING H. 1975. Interaction mechanisms within the atmosphere. In: REEVES RG. (Ed.). *Manual of Remote Sensing*. Fall Church, Virginia: American Association of Photogrammetry, 181–229.
- ICHOKU C, CHU DA, MATTOO S, KAUFMAN YJ, REMER LA, TANRÉ D, SLUTSKER I & HOLBEN BN. 2002. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products. *Geophysical Research Letters*, 29(12): art. 1616.
- IQBAL M. 1983. An introduction to solar radiation. 2nd Ontario: Academic Press, Inc., 389 p.
- KAUFMAN YJ. 1993. Measurements of the aerosol optical thickness and the path radiance. Implications on aerosol remote sensing and atmospheric corrections. *Journal of Geophysical Research*, 98: 2677–2692.
- KING MD, MENZEL WP, KAUFMAN YJ, TANRÉ D, GAO BC, PLATNICK S, ACKERMAN SA, REMER LA, PINCUS R & HUBANKS PA. 2003. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 442–458.
- LEVY RC. 2007. Retrieval of tropospheric aerosol properties over land from inversion of visible and near-infrared spectral reflectance: application over Maryland. (Dissertation) – University of Maryland, Maryland. 236 p.
- LIANG S, FANG H & CHEN M. 2001. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery – Part I: Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 2490–2498.
- LOZANO JAM, UTRILLAS MP, TENA F, PEDRÓS R, CAÑADA J, BOSCA JV & LORENTE J. 2001. Aerosol Optical Characteristics from a Summer Campaign in an Urban Coastal Mediterranean Area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 1573–1585.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. 2007. LAADS Web – Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System. Disponível em: <<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>>. Acesso em: 10 jul. 2007.
- PONZONI FJ, ZULLO Jr. J, LAMPARELLI RAC, PELLEGRINO GQ & ARNAUD Y. 2004. In-flight absolute calibration of the Landsat-5 TM on the test site Salar de Uyuni. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 2761–2766.
- REMER LA, TANRÉ D, KAUFMAN YJ, LEVY R & MATTOO S. 2006. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 5. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf>. Acesso em: 21 set. 2007.
- ROCHFORD PA, ACHARYA PK, ADLER-GOLDEN SM, BERK A, BERNSTEIN LS, MATTHEW MW, RICHTSMIEIER SC, GULICK Jr. S & SLUSSEY J. 2005. Validation and Refinement of Hyperspectral/Multispectral Atmospheric Compensation using Shadowband Radiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43: 2898–2907.
- SEEMANN SW, LI J, MENZEL WP & GUMLEY LE. 2003. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. *Journal of Applied Meteorology*, 42(8): 1072–1091.
- TANRÉ D, HERMAN M, DESCHAMPS PY & De LEFFE A. 1979. Atmospheric Modeling for Space Measurements of Ground Reflectances, including Bidirectional Properties. *Applied Optics*, 18(21): 3587–3594.
- TANRÉ D, DEROO C, DUHAUT P, HERMAN M, MORCLETTE JJ, PERBOS J & DESCHAMPS PY. 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 659–668.
- VERMOTE EF & VERMEULEN A. 1999. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf>. Acesso em: 21 set. 2007.
- ZULLO Jr. J. 1994. Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 189 p.
- ZULLO Jr. J, GUYOT G, GU XF, PINTO HS, HAMADA E, ALMEIDA CAS & PELLEGRINO GQ. 1996. Estimativa do conteúdo de vapor d'água a partir da radiação solar direta. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, 7. Salvador, BA. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 979–980.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Luís Gonçalves Longo de Oliveira. Engenheiro Ambiental formado pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Mestrando em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Área de interesse inclui sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados à engenharia ambiental.

Flávio Jorge Ponzoni. Engenheiro Florestal e Mestre em Ciências Florestais pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Doutor em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Concluiu Pós-doutorado junto ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (CEPAGRI/UNICAMP). Atua desde 1985 como pesquisador da Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As áreas de interesse incluem a caracterização espectral da vegetação, a estimativa de parâmetros biofísicos mediante aplicação de dados orbitais e a calibração absoluta de sensores remotamente situados.

Elisabete Caria Moraes. Formada em Física pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre e Doutora em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Atua como Tecnologista Sênior da Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE, sendo responsável pelo Laboratório de Radiometria desta Divisão. As áreas de interesse incluem Geociências, com ênfase em Meteorologia, principalmente nos seguintes temas: Processos de Transferência Radiativa, interação biosfera-atmosfera, radiação global, balanço radiativo, mudanças climáticas.