

Uma calibração preliminar do canal VIS do sensor GOES 10 Imager

Juan Carlos Ceballos ¹
Leandro Macedo de Oliveira ²

¹ Centro de Previsão de Tempo e estudos Climáticos/INPE
12630-000 Cachoeira Paulista – SP
juanc_ceballos@yahoo.com.br

² FATEC Guaratinguetá
leandro.oliveira@cptec.inpe.br

Abstract.

Satellite image receiving and processing systems provide reflectance factor according to pré-launch calibration. GOES Imager does not perform onboard calibration for VIS channel, which has continuously degraded since GOES launching, more than ten years ago. We present results of two methods suitable for correcting GOES-VIS signal degradation. The first one is a first-order approximation which performs atmospheric correction at low aerosol loading conditions. It was applied to Salar de Uyuni taking profit of existent ground data; the results suggest to use a correction factor $K_{GOES} = 1,50-1,60$. The second method is especially useful for intercomparison between satellites. In lieu of searching fixed well-defined targets, it proposes intercomparison of statistical properties of extended complex systems. Comparison is made between cumulative distribution function for one reference satellite, and several similar functions obtained from applying different correction factors to another satellite. Comparison consists of verifying Euclidean distance between both distributions and choosing the best factor. It is found a scale relationship $K_{G-M} = 1,45$ for GOES-MSG. Results are preliminary but encouraging for creating a local simple but efficient calibration system for VIS- channel of several environmental satellites.

Palavras-chave: GOES 10, SEVIRI, Meteosat Second Generation, calibration, calibração, canal VIS, VIS channel

1. Introdução

Os sensores multiespectrais do tipo Imager nos satélites GOES; AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) nos satélites da série NOAA-n; SEVIRI (no MSG: Meteosat Second Generation) ou MODIS (na série EOS), têm conjuntos de detectores em vários intervalos espectrais da radiação solar (0,4 a 4 μm) e numa faixa restrita do espectro termal terrestre (4 a 14 μm). Basicamente, cada detector é uma célula fotoelétrica que recebe fluxo radiativo F num intervalo espectral estreito $\delta\lambda$, gera uma corrente elétrica e registra uma voltagem U num circuito adequado (Weinreb *et al.* 1997). Em geral, essa voltagem varia quase linearmente com o fluxo F , que por sua vez é proporcional à radiância L incidente:

$$L \propto F = a_0 + b_0 U \rightarrow L = a + b U. \quad (1)$$

A radiância L costuma ser espectral, em unidades $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ster}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, e a voltagem (uma variável contínua) é discretizada em 2^n níveis; este critério permite transmitir a informação sobre U em termos de n bits (formato binário). A informação GOES, NOAA ou MSG tem $n=10$ bits (que descrevem números inteiros entre 0 e 1023: *counts* ou “níveis de cinza”). Assim, a eq. (1) pode ser pensada com U em termos de *counts*, sendo (a,b) os coeficientes de calibração do detector respectivo.

Os detectores expostos ao processo de lançamento, às condições do espaço interplanetário, à espera em órbita até habilitação operacional e ao próprio funcionamento contínuo sofrem degradação progressiva, de forma que os valores dos coeficientes na eq. (1) são variáveis no

tempo. Os canais termais têm um sistema de calibração interna (*onboard*) que permite uma correção contínua dos coeficientes de calibração. O procedimento baseia-se na exposição dos detectores à radiação de um corpo negro com temperatura conhecida, comparando-se seu sinal com a lei de Planck (Weinreb *et al.*, 1997). Este sistema não existe para os canais no espectro solar, para os quais a calibração publicada é a de pré-lançamento (ver por exemplo Weinreb *et al.*, 1999). Para atualizar os coeficientes de calibração, dois métodos usuais podem ser mencionados. O primeiro baseia-se na observação de alvos terrestres com refletância conhecida, podendo-se simular a radiância esperada para o detector e comparar com a radiância aparente medida, ou seja, realizando uma calibração vigária (¹) (Knapp e vonder Haar, 2000). O segundo, consiste da comparação com o sinal observado por outros satélites (Minnis *et al.* 2002, Nguyen *et al.*, 2004).

Neste trabalho apresentamos duas aplicações à calibração do canal VIS do GOES 10 Imager: uma calibração vigária simples e uma comparação com as radiâncias observadas pelo MSG.

2. Materiais e métodos

A descrição de operações dos satélites GOES pode ser encontrada na direção de internet <http://www.oso.noaa.gov/goes/>, e a do sensor Imager em especial, na página <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/imager.html> (acessada em: 02 novembro 2008). O GOES 10 foi originalmente utilizado como GOES-W (localizado sobre o Oceano Pacífico em 134°W), substituído pelo GOES 11 nessa posição, e re-posicionado em 60,405°W. Atualmente fornece arquivos dedicados à América do Sul (Imager a cada 15 minutos, e Sounder completando a varredura do continente a cada 4 horas). A órbita elíptica tem semi-eixo maior com $R_s = 42162,5$ km e excentricidade orbital de 0,000321 (dados orbitais em 29/10/2008). O GVAR informa os coeficientes de calibração *prelaunch* do canal VIS.

2.1. Um método simples de calibração vigária

O método usa o mesmo critério do aplicativo 6S (Vermote *et al.*, 1997), ilustrado na figura abaixo.

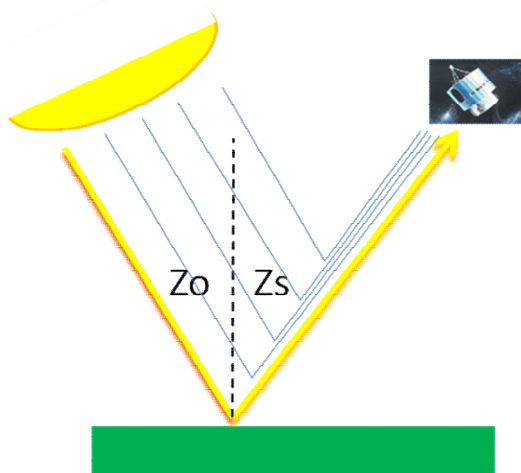


Figura 1: Aproximação de primeira ordem na composição de radiação refletida na atmosfera

Z_o = ângulo zenital dos raios solares
 Z_s = ângulo zenital de visada ao satélite
 R_s = refletância do solo
 τ = profundidade óptica da atmosfera

Amarelo: radiação direta, com reflexão no solo (componente de ordem 1)
Azul claro: raios com dispersão única por ar+aerossol (componente de ordem zero)

Uma aproximação de primeira ordem para a radiância L_s recebida pelo satélite (à esquerda) considera: 1) contribuição L_I , raios diretos incidindo no solo com reflexão lambertiana, mais

¹ Na literatura científica em inglês é usual a frase *vicarious calibration*. Sua tradução literal não é um anglicismo. Segundo o **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa** (2001) tem-se **Vigário: 1.** aquele que substitui outro; **2.** religioso que, investido dos poderes de outro, exerce em seu nome suas funções. Etimologia: do latim *vicarium*, 'o que faz as vezes de outro, substituto'.

propagação na direção do satélite; 2) contribuição L_o , raios diretos interagindo com a atmosfera na linha de visada ao satélite, e sendo dispersados na direção deste. O efeito (1) tende a diminuir o sinal por atenuação de raios diretos na atmosfera, tanto na propagação descendente e como na ascendente, enquanto que o efeito (2) tende a aumentar o “ruído” atmosférico por contribuição da radiação difusa produzida na atmosfera. Uma aproximação de segunda ordem incluiria a contribuição L_2 de raios diretos refletindo-se no solo na vizinhança do alvo, propagando-se em trajetória ascendente e sofrendo uma dispersão na linha de visada ao satélite. Quando a profundidade óptica da atmosfera não é elevada, a aproximação de primeira ordem fornece resultados de boa qualidade na simulação do sinal de satélite.

A componente L_o pode ser avaliada por integração das contribuições de cada espessura dz de atmosfera,

$$dF(dz) = \underline{S_o \lambda \cdot T(m_o, \tau')} \cdot \underline{dA} \cdot \kappa \rho \, ds \cdot \underline{(\omega/4\pi) \cdot P(\Theta)} \cdot \underline{T(m_s, \tau')}, \quad (2)$$

onde o fluxo dF que chega em dz numa área dA perpendicular aos raios diretos (primeiro termo sublinhado) é atenuado por interação com a atmosfera (fração $\kappa \rho \, ds$) no trajeto $ds = m_o \cdot dz$; dessa energia, a expressão sublinhada a seguir expressa a fração dispersada dentro do ângulo sólido $d\Omega$ (²). Essa energia é transmitida (atenuando-se) até o topo da atmosfera. As funções $T(m, \tau') = \exp(-m\tau')$ expressam transmitâncias. A integração da eq. (2) na coluna atmosférica τ' : $(0, \tau)$ produz a estimativa de ordem zero

$$R_{po} = 1/4 \, \omega \, P(\Theta) \{ 1 - \exp[-(m_o + m_s) \tau] \} / (\mu_o + \mu_s). \quad (3)$$

A componente de radiância espectral L_l observada por um satélite com ângulo zenital Z_s ($\mu_s = \cos Z_s$, $m_s = \sec Z_s$) e com ângulo zenital solar Z_o ($\mu_o = \cos Z_o$, $m_o = \sec Z_o$) deve ser

$$L_l = S_o \lambda \, \mu_o \cdot T(\mu_o) \cdot (R_s / \pi) \cdot T(\mu_s), \quad (4)$$

onde T é a transmitância atmosférica, R_s a refletância do solo e o divisor π permite avaliar a radiância emergente sob hipótese de reflexão lambertiana. A refletância planetária medida é a soma das duas contribuições: $R_p = R_{po} + R_{pl}$. Dessa forma, a refletância da superfície R_s pode ser recuperada através do algoritmo seguinte (³):

$$R_{pl} = \pi L_l / \mu_o \cdot S_o \lambda = R_s \cdot T(\mu_o) \cdot T(\mu_s) \rightarrow R_s = (R_p - R_{po}) \exp[(m_o + m_s) \tau]. \quad (5)$$

Para aplicação do algoritmo, escolheu-se como alvo a área do Salar de Uyuni, na Bolívia, coordenadas aproximadas de 20°S 67°W e altitude de 3700 m (Figura 2). Trata-se de uma salineira (*salar*) com pelo menos 10 metros de espessura, 20000 km² de área e grande homogeneidade superficial, seco durante o inverno, com escassa nebulosidade, e com fator de refletância quase constante na faixa espectral do sensor VIS do GOES 10 (Lamparelli *et al.* 2003). Medições em junho de 1999 encontraram para a banda 3 do radiômetro CIMEL e do Landsat TM (0,67 μm) um valor típico de profundidade óptica $\tau = 0,077$ (particionado em 0,027 para dispersão Rayleigh e 0,051 para aerossol). As medições de fator de refletância em três locais do Salar forneceram os valores 0,76±0,08; 0,71±0,11; 0,69±0,17 (Ponzoni *et al.* 2004).

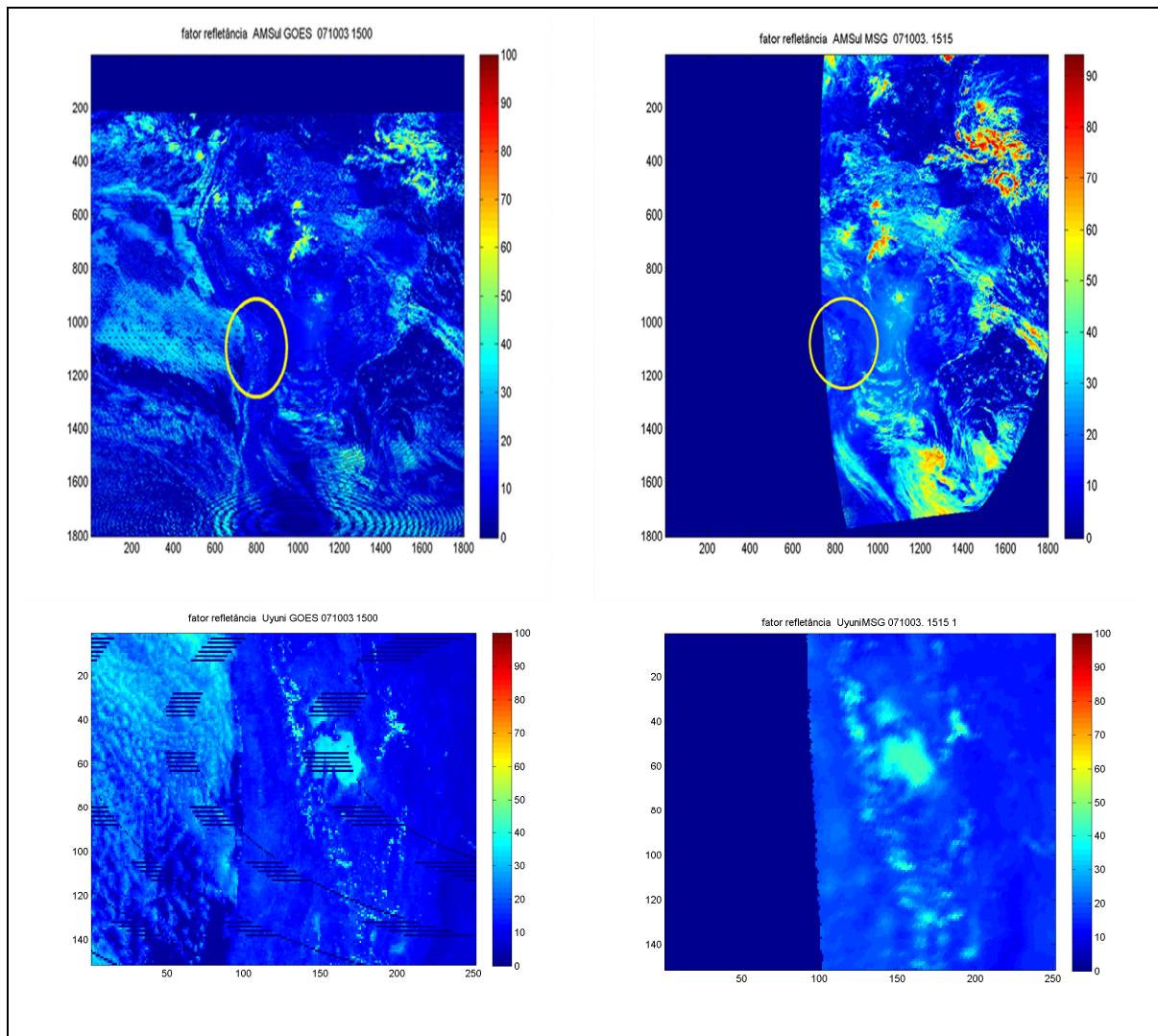
Os valores reduzidos de espessura óptica justificam o uso da aproximação de ordem 1. O cálculo de R_{po} com $\omega = 1$, $P(\Theta) = 1$, $\mu_s = 0,7$ e para o meio-dia local em junho ($Z_o \cong 40^\circ$, $\mu_o \cong 0,77$) fornece $R_{po} \cong 0,28$. Portanto, a correção de ordem zero é pequena e consideramos $\omega = P(\Theta) = 1$ no que segue.

² Aqui, ω é o albedo para dispersão simples (*single scattering albedo*), e $P(\Theta)$ a função de fase padronizada para ângulo de dispersão Θ .

³ Um fator de correção pode ser aplicado na expressão (3), associado à transmitância do ozônio no visível, aqui considerado $F_3 = 1$; assumindo uma aproximação de primeira ordem, também desprezamos outro fator associado a múltiplas reflexões no sistema Terra-atmosfera (Vermote *et al.* 1997).



Figure 2. Localização geográfica do Salar de Uyuni, no contexto das imagens do sensor CCD do satélite CBERS2. Imagens em “falsa cor”. Imagens obtidas na URL <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>



Figuras 3. Fatores de refletância fornecidos em 03/10/2008 15UTC para GOES 10 (esquerda) e MSG (direita). Projeção regular. Acima: América do Sul; abaixo: região do Salar de Uyuni.

As Figuras 3 ilustram os arquivos de fator de refletância de GOES e de MSG fornecidos pelo sistema de ingestão da DSA/CPTEC ⁽⁴⁾ em 03/10/2008 15 UTC. Percebe-se que os valores para GOES são inferiores que para MSG. A diferença se deve a degradação do GOES VIS e não a anisotropia da reflexão, já que o sistema convectivo no Atlântico, em longitudes do terceiro fuso horário, tem de fato geometria similar de ângulo entre incidência e reflexão de luz solar para GOES e MSG.

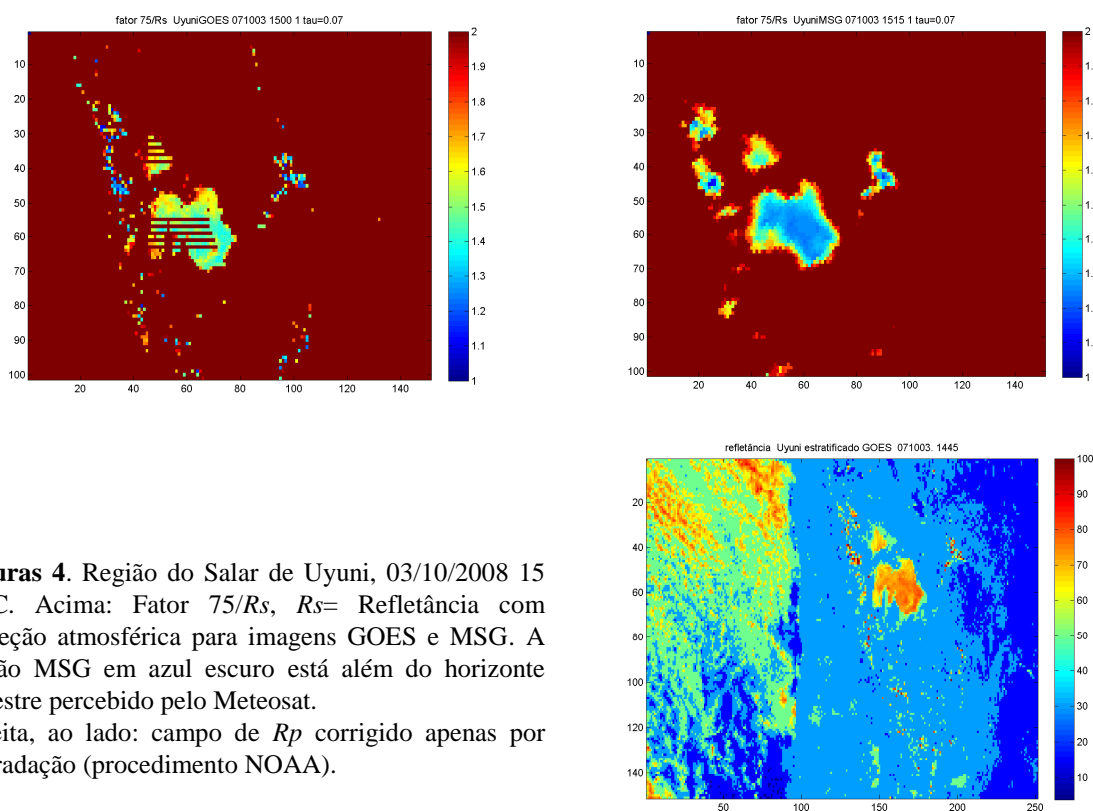
2.2. Um método estatístico de intercomparação

Apesar de sua homogeneidade espacial, as medições *in situ* da refletância do solo apresentam flutuações consideráveis (Ponzoni *et al.* 2004). Aliado a erros de navegação, este fato dificulta a intercomparação entre sinais de satélites. Por outro lado, GOES e MSG têm tamanhos de pixel diferentes (resolução 1 km no nadir com amostragem a cada 4 km, para GOES na DSA/CPTEC; 3 km para MSG). Ainda, a região de Uyuni encontra-se na borda de imagens MSG com deformação considerável da resolução e erros de navegação maiores.

Entretanto, pode-se esperar que médias estatísticas de sistemas não homogêneos apresentem valores semelhantes para diferentes satélites (desde que calibrados), e/ou ofereçam informação sobre fatores de escala que permitam unificar as propriedades estatísticas de dois diferentes sensores. Seguindo este raciocínio, foi escolhido o sistema convectivo observado na Figura 2, no Atlântico ao norte do litoral brasileiro, em longitude da ordem de 40°W. Foram construídas funções de distribuição de frequência acumulada do fator de refletância Fr GOES, $FDP(f * Fr)$ com a escala de Fr afetada por fatores f variados. Procurou-se o fator f que produzisse a menor distância euclidiana entre $FDP(f * Fr)$ e a $FDP(MSG)$.

3. Resultados

As figuras 4 são resultados da correção atmosférica proposta, e de representar o quociente $75/R_s$ (que pode ser interpretado como o fator de correção do sensor VIS no Salar de Uyuni).



Figuras 4. Região do Salar de Uyuni, 03/10/2008 15 UTC. Acima: Fator $75/R_s$, R_s = Refletância com correção atmosférica para imagens GOES e MSG. A região MSG em azul escuro está além do horizonte terrestre percebido pelo Meteosat. Direita, ao lado: campo de R_p corrigido apenas por degradação (procedimento NOAA).

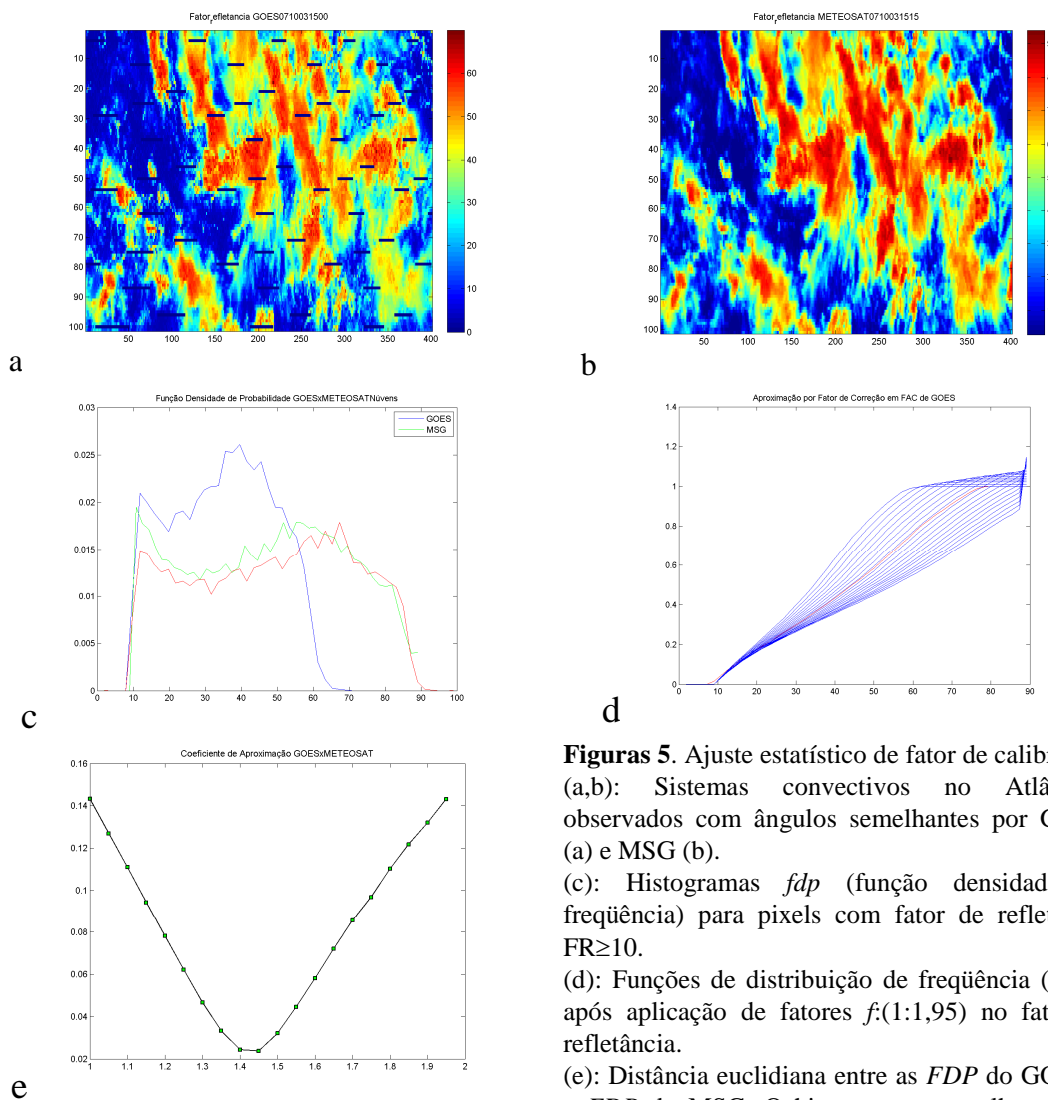
⁴ Os arquivos são fornecidos em projeção satélite. A figura ilustra a projeção de cada pixel em projeção regular LAT/LON.

Observa-se que o fator de correção para GOES dentro de Salar teria uma variabilidade espacial maior do que a esperada; considerando os locais de medição informados por Ponzoni et al. (2004), o fator K_{GOES} parece estar entre 1,5 e 1,6. Para o canal VIS do MSG, o fator seria da ordem de $K_{MSG}=1,3$. É interessante observar a coerência da imagem, apesar de situar-se na borda do campo de observação do Meteosat.

A figura apresenta também a refletância planetária R_p gerada como subproduto do Modelo GL de radiação solar (descrição e resultados do modelo na página internet <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>), a qual aplica correção por degradação utilizada na NOAA, segundo Chang et al. (página internet acessada em 2007). A imagem apresenta valores de R_p no Salar que são compatíveis com as medições *in situ*. O resultado geral é relativamente indefinido, e sugere realizar um número elevado de observações e sua estatística. As figuras 5 abaixo descrevem o ajuste estatístico entre a mesma cena em GOES e MSG. A vantagem do processo é que não precisa de uma correspondência explícita pixel-a-pixel ou de exatamente a mesma área. Na construção dos histogramas de frequência (c) são considerados pixels com nuvens, portanto um limiar de fator de refletância. A distância entre FDPs é avaliada segundo

$$\langle d^2 \rangle = \sum_{i=1, Nbins} [FDP(FR_i^*) - FDP(FR_i)]^2 / Nbins, \quad FR^* = f \cdot FR$$

$Nbins$ é o número de intervalos nos histogramas; o fator f gera uma nova escala de FR , com uma nova distribuição de frequências.



Figuras 5. Ajuste estatístico de fator de calibração. (a,b): Sistemas convectivos no Atlântico, observados com ângulos semelhantes por GOES (a) e MSG (b). (c): Histogramas f_{dp} (função densidade de frequência) para pixels com fator de refletância $FR \geq 10$. (d): Funções de distribuição de frequência (FDP) após aplicação de fatores f :(1:1,95) no fator de refletância. (e): Distância euclidiana entre as FDP do GOES e a FDP do MSG. O histograma vermelho em (c) corresponde à distância mínima (fator $f=1,45$)

Para outubro de 2008, o fator de ajuste entre as populações GOES e MSG é $K_{G-M} = 1,45$. O histograma resultante exibe excelente ajuste com o de MSG, de acordo com a figura (c). No método de calibração com alvo terrestre, tinha-se $K_{GOES/KMSG} = 1,15-1,20$; todavia, as geometrias de visada ao alvo (Salar de Uyuni) eram muito diferentes e o resultado para MSG não confiável. Entretanto, o método estatístico produz resultados que sugerem alta confiabilidade para intercomparação. Nesse caso, $K_{GOES/FG-M} = 1,03-1,10$ o que sugere uma considerável estabilidade do fator de calibração MSG.

4. Conclusões

Uma aproximação de primeira ordem permite aplicar algoritmo simples de correção atmosférica nos casos de profundidade óptica pequena. A comparação com dados de verdade terrestre indica que o fator de correção por degradação aplicável ao sensor GOES 10 VIS é da ordem de 1,50-1,60, compatível com correções aplicadas pela NOAA e pela NASA. O Salar de Uyuni aparece como um alvo excelente para calibração na banda visível.

Um método estadístico de ajuste fornece resultados extremamente coerentes na intercomparação de satélites. A aplicação a um sistema convectivo complexo indica que o coeficiente de correção do GOES relativo ao MSG é $K_{G-M} = 1,45$.

Estudos sistemáticos de comparação com alvo terrestre, assim como de intercomparação GOES-MSG e GOES-AVHRR são recomendados. O método estatístico pode manifestar-se de alta qualidade em intercomparações.

Reconhecimentos. O segundo autor é bolsista de iniciação científica do CNPq (programa PIBIC/INPE). O trabalho encontra-se no marco conceitual do projeto CNPq num.

Referências

Chang, I-Lok; Michael Weinreb, Charles Dean, David Crosby, Dejiang Han, Jeanette Baucom, Xiangqian Wu (2006). Vicarious Calibration of GOES Imager Visible Channel: Use of Stars for Responsivity Trending. URL <http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/visible-channel.htm>

Knapp, K. R., and T. H. Vonder Haar. Calibration of the eighth Geostationary Observational Environmental Satellite (GOES-8) imager visible sensor. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 1639–1642, 2000.

Lamparelli, R.A.C., F.J. Ponzoni, J. Zullo Jr., G.Q. Pellegrino, Y. Arnaud. Characterization of the Salar de Uyuni for In-Orbit Satellite Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 41, 1461- 1468, 2003.

Minnis, P., L. Nguyen, D.R. Doelling, D.F. Young, W.F. Miller, D.P. Kratz. Rapid Calibration of Operational and Research Meteorological Satellite Imagers. Part I: Evaluation of Research Satellite Visible Channels as References. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 19, 1233-1249, 2002.

Nguyen, L.; D.R. Doelling; P. Minnis; J. K. Ayers. Rapid technique to cross calibrate satellite imager visible channels. *Earth Observing Systems IX Conference*, International Symposium on Optical Science and Technology SPIE 49th Annual Meeting, Denver, CO, 2-6 August 2004

Ponzoni, F.J., J. Zullo Jr., R.A.C. Lamparelli, G.Q. Pellegrino. In-Flight Absolute Calibration of the Landsat-5 TM on the Test Site Salar de Uyuni. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 42, 2761- 2766, 2004.

Rao, C.R. Nagaraja (2001). Implementation of the post-launch vicarious calibration of the GOES imager visible channel. URL <http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/vicariouscalibration.htm>

Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman, J.J. Morcrette. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 35, 675-686, 1997.

Weinreb, M.P., M. Jamison, N. Fulton, Y. Chen, J.X. Johnson, J. Bremer, C. Smith, and J. Baucom. Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 imagers and sounders. *Applied Optics*, **36**, pp 6895-6904, 1997.

_____ **Operational Calibration of the Imagers and Sounders on the GOES-8 and -9 Satellites.** NOAA Satellite and Information Service, Página internet NOAA <http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/contents/page1.htm> [última revisão em 1997; acesso em outubro 2008].