

Análise dos diferentes estágios da queimada através do sensor *Modis Airborne Simulator*

Ricardo José de Paula Souza e Guimarães^{1,2}

Thelma Krug³

Alberto Waingort Setzer¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
ricardo@dpi.inpe.br; setzer@ltd.inpe.br

²Programa de Pós-Graduação da Santa Casa de Misericórdia de Belo Horizonte, MG, Brasil

³Inter-American Institute for Global Change Research - IAI
Av. dos Astronautas, 1758 – Cep: 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
thelma@dir.iai.int

Abstract. During the *Smoke/Sulfate, Clouds, and Radiation - Brazil* experiment (SCAR-B), held in Brazil from 08/19/1995 to 09/14/1995, several (fire) hot spots were observed. The data from bands 31 (3,74 μ m), 45 (11,02 μ m) and 46 (11,96 μ m) of the *Modis Airborne Simulator* (MAS) sensor, which was one of the sensors of the experiment, were useful to help identify regions associated with different burning phases (stages). In this study, six burning phases were considered: F1, F2, F3, F4 and F5. A non-burnt area was also included in the analysis (FP). A visual analysis of the mean values generated from samples extracted from each of the six phases (F1, F2, F3, F4, F5 and FP) indicated a provisional “best” interval for the discrimination of the different phases of the burning. From this provisional interval, a statistical analysis based on hypothesis testing was conducted, to refine the interval visually characterized. The statistical analysis indicated that the interval between band 16 (1,932 μ m) and band 28 (3,28 μ m) is the best to differentiate biomass burning phases. Despite bands 45 and 46 have not been considered in the statistical analysis, they have show a great value to discriminate the phases of burning. It was also identified that band 31 is adequate to differentiate burnt areas (active fire, forest fire marks) from those non-burnt, but without the capability to discriminate the different phases of the burning.

Palavras-chave: remote sensing, Modis Airborne Simulator, biomass burning, sensoriamento remoto, queimadas.

1. Introdução e objetivos

O fogo tem sido usado pelo homem há milênios com o objetivo de remover resíduos oriundos da derrubada de florestas, abrir novas áreas agrícolas, preparar caminhos, limpar terrenos e plantações, renovar áreas de pastagens e adubar a terra com a cinza resultante da queima da vegetação, entre outros. Assim, as queimadas têm sido fonte de grande interesse por atuarem como um importante agente modificador da estrutura da vegetação e transformador da paisagem, entre outras coisas. As queimadas produzem aumento da temperatura do ar e do solo, diminuição dos nutrientes e da matéria orgânica no solo (Coutinho, 1980).

A queima da biomassa é comum principalmente nos trópicos, durante a estação seca, sendo responsável por cerca de 20% das emissões de fumaça. Embora a combustão da biomassa seja dominada pela emissão de CO₂, muitos produtos de combustão incompleta também exercem importante papel no clima, na química da atmosfera e na ecologia regional e global, tais como CO, H₂, CH₄, aldeídos, cetonas e ácidos orgânicos, além de compostos contendo N e S como, por exemplo, NO, NH₃, HCN, CH₃CN, SO₂, COS. A fumaça também contém partículas constituídas por materiais orgânicos (carbono) e materiais inorgânicos (K₂CO₃ e SiO₂) (Crutzen e Andreae, 1990).

A composição dos gases resultantes da queima da biomassa depende de fatores como: a composição química, a estrutura, o tamanho e o teor de umidade da biomassa, a temperatura

da queima e a taxa de aeração. Por isso, diferentes ecossistemas têm características físicas e químicas que afetam a combustão eficiente do fogo (Susott et al., 1991; Ward et al., 1992; Araujo, 1995).

A utilização das técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento de queimadas no país tem sido realizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através de um sistema operacional de queimadas que utilizam dados do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration* (AVHRR/NOAA) (Krug et al., 1997).

Vários estudos de cooperação internacional foram realizados no Brasil, envolvendo a questão de queimadas e suas implicações na atmosfera. Dentre eles, citam-se o *Global Tropospheric Experiment/Amazon Boundary Layer Experiment* (GTE/ABLE-2A) e o experimento *Smoke/Sulfate, Clouds, and Radiation - Brazil* (SCAR-B). O GTE/ABLE-2A ocorreu no Brasil no período de 19/07/1985 a 09/08/1985, com o objetivo de coletar gases-traços e aerossóis na troposfera Amazônica (Pereira, 1987). O SCAR-B foi realizado no período de 16/08/1995 à 14/09/1995, como resultado de uma iniciativa conjunta entre o INPE e a NASA, e que objetivou medir as propriedades da fumaça, aerossóis urbano/industrial e avaliar seus efeitos nas nuvens e seu poder radiativo no clima (Kaufman et al., 1997).

Os produtos de sensoriamento remoto apresentam constantes aperfeiçoamentos, como melhoria nas resoluções espacial, temporal e radiométrica e, a inclusão de novas faixas do espectro eletromagnético. Um exemplo característico desta melhoria é o número de bandas espectrais (36) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) do Programa *Earth Observing System* (EOS), comparado com a de outros sensores orbitais que apresentam, no máximo, dez bandas.

O desenvolvimento de novas tecnologias em sensores demonstra o reconhecimento da importância desta ferramenta para o monitoramento e o estudo das queimadas, garantindo a continuidade dos programas voltados para este fim.

O propósito do sistema de monitoramento global de incêndios é melhorar o acesso no papel da queima da biomassa como um potencial elemento significativo na grande cadeia de controle humano para o principal evento das mudanças de grande escala no sistema Terra. O problema da queima da biomassa é identificar corretamente e medir possíveis mudanças na magnitude e características das fontes de emissão. O requerimento básico são dados relacionados com a referência espacial e temporal nas condições de vegetação, ocorrência de fogo e quantidade de biomassa queimada. A estrutura de cenários de mudanças climáticas que poderão levar ao estresse na vegetação, redução da reserva de água no solo e no acúmulo de combustíveis no ecossistema (Malingreau e Gregoire, 1996).

Frente à importância da detecção de queimadas e a relevância do tema para o país, surgiu a proposta do presente trabalho com o objetivo de utilizar os dados do sensor *Modis Airborne Simulator* (MAS), que possui 50 bandas espectrais compreendidas na faixa de 0,55 a 14,2 μ m, do Experimento SCAR-B, para identificar as bandas que permitem a melhor discriminação dos vários estágios da queima de biomassa.

2. Materiais e métodos

A área de estudo compreende parte dos Estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Rondônia e Tocantins, onde foi realizado o experimento SCAR-B. A escolha das imagens (linhas de vôo) foi feita a partir da visualização dos resultados das missões do SCAR-B disponíveis na Internet, no endereço:

<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/MODIS/MAS/scarbhome.html>.

O Experimento SCAR-B compreendeu 16 missões (uma missão por dia), cobrindo áreas de cerrado e de florestas no Brasil.

2.1. Escolha das imagens

Foram selecionadas 39 imagens que continham regiões de queimadas (marcas da queima, fogo ativo e fumaça). O tamanho de cada sub-imagem, nome dado às áreas que foram recortadas da imagem original com o intuito de facilitar o processamento e a análise dos resultados das imagens, foi definida pela área que apresentava queimada e uma área adicional, no entorno da mesma (área “buffer”), úteis para caracterizar o comportamento espectral de áreas não submetidas à ação do fogo.

2.2. Transectos

De forma a auxiliar a delimitação das áreas afetadas pelo fogo nas suas diferentes fases, identificou-se linhas (ou transectos) nas sub-imagens. Esses transectos não seguiram uma orientação padrão fixa, mas foram definidos de forma a acompanhar a evolução da queimada, como pode ser observado na **Figura 1**. Assim, para cada sub-imagem utilizada, identificou-se o intervalo de temperatura de brilho associado a cada fase do fogo. Assegurou-se, também, para cada sub-imagem utilizada, a observação dos valores de temperatura de brilho ao longo de um transecto selecionado em uma área não queimada.

Flasse e Ceccato (1996), Justice et al. (1996) e Giglio et al. (1999), usaram as bandas 3 ($3,8\mu\text{m}$) e 4 ($10,8\mu\text{m}$) do sensor AVHRR/NOAA em algoritmos para detecção de focos de calor. Price (1984) usou as bandas 3, 4 e 5 ($11,9\mu\text{m}$) do sensor AVHRR/NOAA para implementar um modelo que estima as temperaturas da superfície. Assim, baseado nesses comprimentos de onda citados, foram utilizadas as bandas $3,74\mu\text{m}$, $11,02\mu\text{m}$ e $11,96\mu\text{m}$ do sensor MAS como referência para a identificação dos transectos nas áreas queimadas.

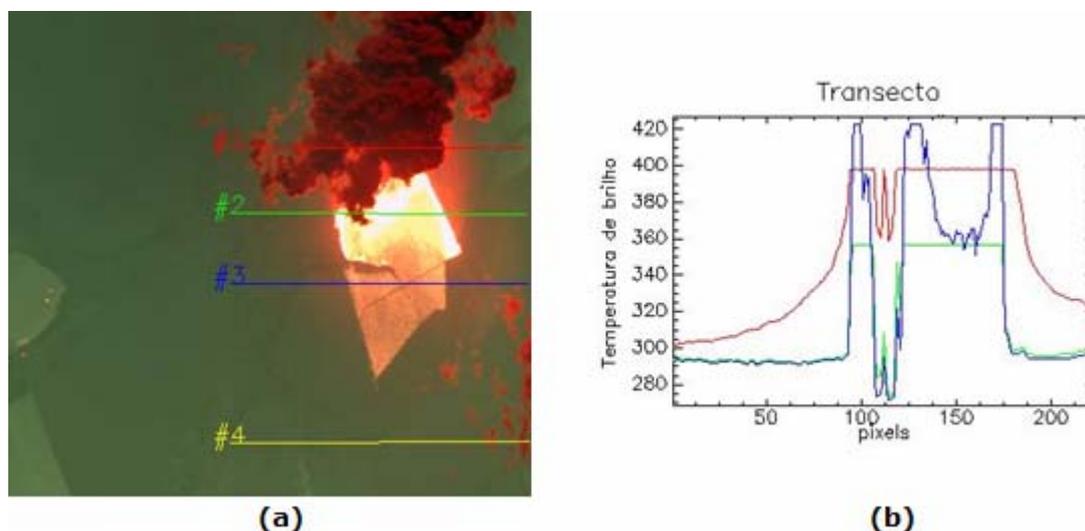


Figura 1 - (a) Composição colorida da sub-imagem MAS 95163_17 das bandas $3,74$ (R), $11,02$ (G) e $11,96$ μm (B); (b) valores de temperatura de brilho dos pixels sequenciais do transecto #2 nas bandas $3,74$ (vermelho), $11,02$ (verde) e $11,96$ μm (azul).

2.3. Região de interesse (ROI)

Das 39 sub-imagens disponíveis, selecionou-se um conjunto menor, de forma a assegurar um volume de dados aceitável para cada classe de queimada de interesse e facilitar o processamento e a análise estatística das imagens.

A decisão sobre o número de sub-imagens a ser utilizado neste estudo baseou-se no comportamento das médias das temperaturas de brilho associadas a cada fase gerada a partir de dois conjuntos de 5 sub-imagens, com seis regiões de interesse (ROI), a saber:

- F1 - Região que compreende os pixels associados ao maior valor de temperatura de brilho nas áreas de fogo intenso;
- F2 - Região que compreende os pixels associados ao menor valor de temperatura de brilho nas áreas de fogo intenso;
- F3 - Região que compreende os pixels associados ao maior valor de temperatura de brilho nas áreas entre o fogo intenso e a cicatriz de queimada;
- F4 - Região que compreende os pixels associados ao menor valor de temperatura de brilho nas áreas entre o fogo intenso e a cicatriz de queimada;
- F5 - Região que compreende os pixels associados a cicatrizes de queimada; e
- FP - Região que compreende os pixels das áreas não afetadas pelo fogo.

De forma a assegurar que essas regiões não incluíssem pixels *contaminados* ou com valores *aberrantes* (*outliers*), delimitou-se visualmente, nas 10 sub-imagens, áreas amostrais correspondentes às regiões de interesse.

2.4. Análise estatística

Para o cálculo das médias, foram utilizados os dados das médias de cada uma das seis regiões de interesse, das 50 bandas e das 10 sub-imagens, baseadas em amostras de tamanho variável.

Essas médias foram convertidas para um gráfico que permitiu, através da análise visual, selecionar um conjunto inicial de bandas para uma análise estatística mais detalhada.

A fórmula utilizada para determinar as médias da temperatura de brilho, para cada fase j da queimada, em cada banda b foi:

$$\bar{x}_{jb} = \frac{\sum_i n_{ijb} \bar{x}_{ijb}}{\sum_i n_{ijb}}$$

Onde: \bar{x}_{jb} = média da temperatura de brilho média, da fase j , na banda b ; n_{ijb} = número de pixels na ROI i , associados à fase j , na banda b ; \bar{x}_{ijb} = média das temperaturas de brilho da ROI i , associada à fase j , na banda b .

Após a estatística preliminar foi realizada uma análise estatística das bandas selecionadas. Foram utilizados os valores das imagens originais, ou seja, foram excluídos os valores dos pixels saturados e utilizados os valores de radiância das ROIs de cada banda, em vez do valor de temperatura de brilho.

A partir da identificação de um intervalo de bandas que, visualmente, discriminou bem as diferentes regiões de interesse, procedeu-se a uma análise estatística mais detalhada. Para esta análise, foram agrupados os valores de radiância extraídos das ROIs de cada sub-imagem utilizada, gerando conjuntos de amostras de tamanho variável, n_i , $i = 1, \dots, 6$.

Utilizaram-se as seguintes fórmulas para determinar a média e o desvio padrão de cada região para as bandas selecionadas:

$$\bar{x} = \frac{\sum xf}{\sum f} \qquad s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Onde: \bar{x} = média; n = número de pixels; x = valor de radiância; f = frequência de x ; s = desvio padrão.

2.4.1. Teste para diferença entre as médias de radiância das diferentes fases de queima

Com o objetivo de verificar se havia diferença significativa entre as médias associadas às diferentes ROIs, para as bandas compreendidas no intervalo visualmente identificado, [a,b], procedeu-se ao teste de hipóteses para testar a existência de diferença significativa entre as médias para as regiões F1, F2, F3, F4, F5 e FP. Utilizou-se o procedimento tradicional de teste de hipóteses, descrito em Chase e Bown (1986), detalhado abaixo.

1. Hipótese nula: $H_0 : \mu_i - \mu_j = 0$, onde μ_i e μ_j representam as verdadeiras médias de radiância para as bandas b_i e b_j

Hipótese alternativa: $H_1 : \mu_i - \mu_j \neq 0$

2. Nível de significância $\alpha = 0,05$

3. Teste estatístico:

$$z = \frac{(\bar{x}_i - \bar{x}_j) - (\mu_i - \mu_j)}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_i^2}{n_i}\right) + \left(\frac{\sigma_j^2}{n_j}\right)}}$$

Onde: σ_i^2 e σ_j^2 são as variâncias das radiâncias para as fases de queima i e j . Essas variâncias são estimadas a partir das variâncias amostrais, utilizando os dados das amostras de tamanho n_i e n_j associadas às fases de queima i e j , respectivamente.

4. Região crítica: $z \geq 1,96$ ou $z \leq -1,96$; onde z é o valor, na distribuição normal padrão, do qual a área abaixo da fração de distribuição é 0,025.

5. Decisão: Aceita-se H_0 se $-1,96 \leq z \leq 1,96$; e conclui que não existe diferença significativa entre as médias

Aceita-se H_1 se $z \geq 1,96$ ou $z \leq -1,96$; e conclui-se que, ao nível de significância de 0,05; existe diferença significativa entre as médias.

As fórmulas utilizadas para o cálculo das médias e das variâncias foram:

$$\text{Média} \Rightarrow \bar{x}_{ib} = \frac{\sum_{p=1}^{n_{ib}} x_{pib}}{n_{ib}} \quad \text{Variância} \Rightarrow S_{ib}^2 = \frac{\sum_{p=1}^{n_{ib}} (x_{pib} - \bar{x}_{ib})^2}{n_{ib} - 1}$$

Onde, x_i é o valor de radiância associado ao pixel p , da fase i e banda b .

3. Resultados e discussões

3.1. Avaliação dos transectos e das ROIS

Para cada sub-imagem, foram selecionados transectos de forma a se obter valores característicos de temperatura de brilho para cada fase de queima. Os valores observados nos diferentes transectos auxiliaram a delimitar as ROIs nas sub-imagens selecionadas. A banda 11,96 μm foi utilizada como referência para a extração dos valores máximo, mínimo, média e desvio padrão das temperaturas de brilho de cada ROI, em cada sub-imagem utilizada. Esta banda permitiu uma maior separabilidade das fases de queima nas ROIs do que as bandas 3,74 e 11,02 μm .

3.2. Avaliação dos dados estatísticos

A **Figura 2** apresenta o gráfico das médias das amostras constituídas para cada ROI, para cada banda do MAS. As médias apresentadas na **Figura 2** foram geradas a partir das médias

de cada sub-imagem, ponderadas pelo número de pixels em cada uma delas, conforme descrito em Materiais e Métodos.

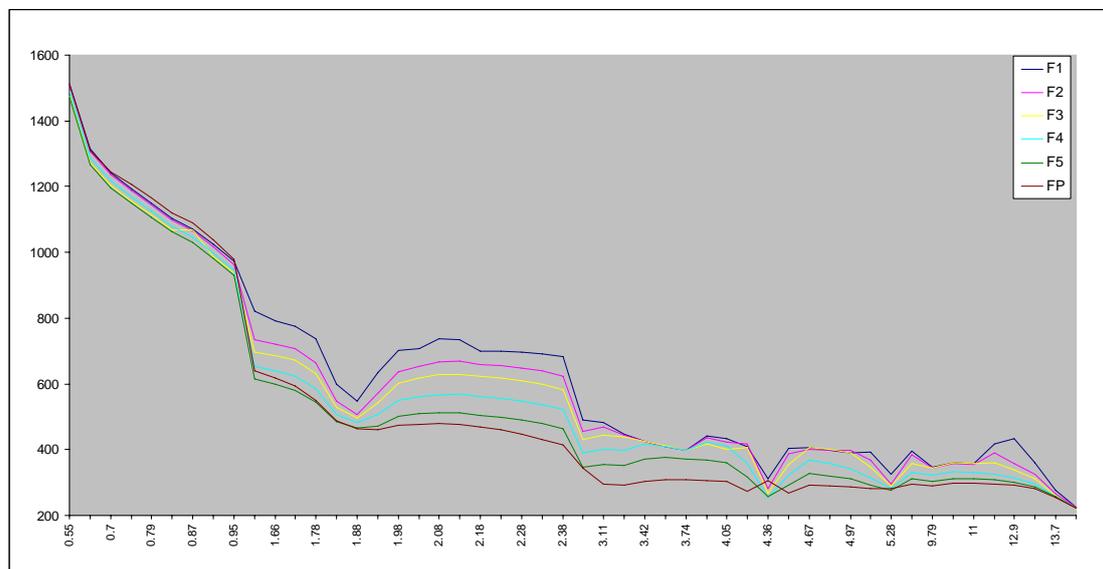


Figura 2 - Médias amostrais das temperaturas de brilho (em Kelvin).

Observa-se, na **Figura 2**, que as bandas compreendidas no intervalo de 1,879 a 3,59 μm apresentaram uma maior discriminação entre as regiões de interesse (F1, F2, F3, F4, F5 e FP). Esta observação orientou a análise estatística dos dados para que esta se concentrasse, inicialmente, neste intervalo. Alguns intervalos foram descartados imediatamente (como, por exemplo, o intervalo de bandas compreendido entre 0,547 até 1,609 μm), por indicar grande margem de confusão na discriminação das diferentes fases da queimada. Outros intervalos foram descartados (como, por exemplo, de 3,59 a 3,90 μm ou de 10,55 a 13,23 μm) por incluírem bandas que foram utilizadas para definir as ROIs (no caso, as bandas 3,74 , 11,02 e 11,96 μm).

3.2.1. Teste de hipóteses para a diferença entre as médias das radiâncias nas bandas selecionadas

As médias e os desvios padrão das amostras de radiância compreendidas no intervalo das bandas 1,879 a 3,59 μm , para cada ROI, foram utilizadas para efetuar o teste de diferenças entre médias descrito na seção 2.4.1. Foram efetuados testes para verificar a existência de diferença significativa entre as médias das ROIs F1 e F2, F2 e F3, F3 e F4, F4 e F5, e F5 e FP, ao nível de significância de 0,05.

A análise dos valores z apresentados na **Tabela 1** indica que não existe diferença significativa, ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, entre as médias das radiâncias nos seguintes casos:

- Banda 1,879 μm : entre F5 e FP;
- Banda 3,42 μm : entre F1 e F2, e entre F2 e F3; e
- Banda 3,59 μm : entre F1 e F2,

Desta forma, a partir desta análise, foram desconsideradas da identificação do melhor intervalo para diferenciação entre as diferentes fases da queimada, as bandas 1,879 μm , 3,42 μm e 3,59 μm .

Tabela 1 – Valores da estatística z.

μm	F1-F2	F2-F3	F3-F4	F4-F5	F5-FP
Banda 1,879	12,25377	4,268895	9,387499	11,24014	-0,354126
Banda 1,932	11,79634	5,496117	10,49617	9,043868	2,527733
Banda 1,979	6,884392	6,260345	15,43184	12,26562	9,334066
Banda 2,030	11,0815	8,459186	18,40914	12,8735	9,259276
Banda 2,080	14,89516	9,649634	18,21098	13,22054	9,799189
Banda 2,129	14,56438	10,41122	19,26984	13,52957	10,32058
Banda 2,178	11,7267	8,415902	21,13153	15,25516	10,74491
Banda 2,227	12,17542	8,352035	21,68628	15,40269	11,16786
Banda 2,276	14,16532	10,20988	22,14749	15,42833	12,33135
Banda 2,327	12,87397	10,93024	22,48791	15,83901	13,58322
Banda 2,375	10,17667	8,5856	20,57556	14,27766	16,8762
Banda 2,96	10,37739	10,83889	23,25253	18,81047	16,61479
Banda 3,11	9,14732	14,0749	35,18977	23,47323	19,79984
Banda 3,28	2,696479	8,520969	41,42606	31,28404	21,55221
Banda 3,42	1,413626	-1,730523	9,467255	29,29121	25,21202
Banda 3,59	1,729016	-2,369539	5,164403	32,45956	28,38967

4. Conclusões e recomendações

- Os resultados deste estudo permitiram concluir que é possível diferenciar as diversas fases da queimada, desde fogo ativo até as cicatrizes provocadas pelo fogo.

- O intervalo espectral identificado neste trabalho como o mais apropriado para diferenciar as diversas fases da queimada, de 1,932 μm a 3,28 μm , sugere que a banda 7 do sensor MODIS (2,105 μm a 2,155 μm), cujo sensor possui 36 bandas espectrais, variando de 0,405 μm a 14,39 μm , seja a mais apropriada para monitorar o comportamento das queimadas em suas diferentes fases. Esta banda equivale ao ponto central da banda 20 do MAS, igual a 2,129 μm .

- A análise gráfica das médias, apesar de essencialmente subjetiva, revelou características interessantes sobre o comportamento das médias de temperatura de brilho nas diferentes bandas estudadas. Permitiu, com bastante clareza, que a análise estatística mais detalhada se concentrasse em um conjunto mais limitado de bandas, facilitando o processamento e a análise das imagens.

- A utilização do intervalo de comprimento de onda 1,979 a 2,375 μm para implementar novos algoritmos para detecção de queimadas; e

- A banda 31 (ponto central em 3,74 μm) mostrou-se mais adequada para diferenciar queimada de não queimada. Esta banda é equivalente à banda 20 (3,66 μm a 3,84 μm) do MODIS.

Recomenda-se utilizar os dados do intervalo 1,979 a 2,375 μm em conjunto com dados de outras bandas centradas no comprimento de onda de 3,8 e/ou 10,8 μm , pois no intervalo de 2,2 a 2,5 μm observa-se sérios problemas com contaminação solar decorrentes de reflexão solar no topo das nuvens, pontos brilhantes; que podem ser confundidos com as áreas queimadas.

Agradecimentos

Os autores reconhecem o suporte financeiro da CAPES e o INPE pelo suporte operacional.

Referências

- Araújo, T. M. **Investigação das taxas de dióxido de carbono gerado em queimadas na Região Amazônica**. Guaratinguetá. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - UNESP, 1995.
- Chase, W; Bown, F. **General Statistics**. 2ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 719 p.
- Coutinho, L. M. As queimadas e seu papel ecológico. **Brasil Florestal**, v. 44, n. 4, p. 7-23, out.-nov.-dez., 1980.
- Crutzen, P. J.; Andreae, M. O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 4988, n. 250, p. 1669-1678. 1990.
- Flasse, S. P.; Ceccato, P. A contextual algorithm for AVHRR fire detection. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p. 419-424, 1996.
- Giglio, L.; Kendall, J. D.; Justice, C. O. Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n 10, p. 1947-1985, 1999.
- Justice, C. O.; Kendall, J. D.; Dowty, P. R.; Scholes, R. J. Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA-AVHRR data. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n.D19, p. 23851-23863, 1996.
- Kaufman, Y.J.; Remer, L.A.; Kleidman, R.; Holben, B.N. Remote sensing of aerosol, fires and their effects on clouds and climate in the SCAR experiments. **SCAR-B Proceeding**. São José dos Campos: Transtec Editorial. p. 89-98, 1997.
- Krug, T.; Oliveira, G. S.; Valenzuela, G. C. L.; Setzer, A. W. **Incidência de queimadas nos períodos de junho a novembro de 1995 e 1996 detectadas pelo sensor AVHRR dos satélites NOAA**. São José dos Campos: INPE 1997.
- Malingreau, J. P.; Gregoire, J. M. Developing a global vegetation fire monitoring system for global change studies: A framework A. In: Levine, J.S., ed. **Biomass burning and global change**. Cambridge, England: MIT Press. 1996. cap. 2, p. 14-24.
- Pereira, M. C. **Deteção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens de satélite NOAA e Landsat, e dados de aeronave**. São José dos Campos. 268p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, 1987.
- Price, S. D. Land surface temperature measurements from the split window channels of NOAA 7 AVHRR. **Journal of Geophysical Research** v. 89, p. 7231-7237, 1984.
- Susott, R. A.; Ward, D. E.; Babbitt, R. E.; Latham, D. J. The measurement of trace emissions and combustion characteristics for a mass fire. In: Levine, J.S., ed. **Global biomass burning**. Cambridge, England: MIT Press. 1991. cap. 32, p. 245-257.
- Ward, D. E.; Susott, R. A.; Kauffman, J. B.; Babbitt, R. E.; Clumblings D. L.; Dias, B.; Holben, B. N.; Kaufman, Y. J.; Rasmussen, R. A.; Setzer, A. W. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B Experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, p. 14601-14619, 1992.