

# Mapeamento de cicatrizes de queimadas na amazônia brasileira a partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral em imagens do sensor MODIS

André Lima<sup>1</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro<sup>1</sup>  
Marcos Adami<sup>1</sup>  
Ramon Morais de Freitas<sup>1</sup>  
Luiz Eduardo Aragão<sup>2</sup>  
Antônio Roberto Formaggio<sup>1</sup>  
Roberto Lombardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{andre; yosio; adami; ramon; formag; lombardi}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Oxford University Centre for the Environment, University of Oxford, OX1 3QY, UK  
laragao@ouce.ox.ac.uk

**Abstract**-The objective of this paper is to present a method for mapping burned areas in Brazilian Amazonia using Terra MODIS Daily reflectance data (MOD09). The proposed approach is based on INPE's DETER (Detection of Deforested Areas in Real Time Project) method that applies image segmentation to the fraction images derived from MODIS, using a non-supervised classification per region algorithm followed by manual image editing procedure for minimizing misclassifications. The results of multitemporal analysis with MODIS showed that about 50,000 km<sup>2</sup> of land surface were burned in Brazilian Amazon. This information is critical for regional and global environmental studies. The results showed that MODIS sensor daily data is a useful source of information for mapping burned areas and the proposed method can be used in an operational project in Brazilian Amazon.

**Palavras-chave:** remote sensing, burned scars, unmixed model, sensoriamento remoto, cicatrizes de queimadas; modelo linear de mistura espectral.

## 1. Introdução

O relatório de 2007 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da ONU trouxe informações consistentes sobre a influência antrópica no aquecimento global do planeta (IPCC, 2007). Este relatório apontou a necessidade imediata de reduzir a emissão dos gases do efeito estufa e as conseqüências futuras da não resolução deste problema. A participação do Brasil no computo das emissões globais dos GEE é pequena comparada à emissão dos países desenvolvidos, 2,5% da emissão mundial, conforme documento oficial da Convenção de Clima das Nações Unidas (UNFCCC, 2006). Deve-se ressaltar que a matriz energética brasileira baseia-se, principalmente, em hidrelétricas, que mesmo trazendo impactos ambientais, não está diretamente associada à emissão de GEE (salvo a liberação de metano na decomposição da vegetação inundada em represas). Outro ponto favorável ao Brasil, e que contribuirá na contabilização de emissões é o já estabelecido Programa Nacional de Biodiesel que visa a substituir os combustíveis fósseis por biocombustíveis. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), os veículos com tecnologia flex (movidos a Álcool e/ou Gasolina) correspondem a 77% das vendas (ANFAVEA, 2007).

Porém, as autoridades, bem como a sociedade brasileira, deve se ater ao controle da principal fonte de seu volume de emissões de GEEs, as queimadas das florestas tropicais, a qual responde por cerca de 75% do volume CO<sub>2</sub> emitido pelo país (MCT, 2004). Sendo assim, o mapeamento das áreas queimadas situadas na Floresta Amazônica, maior floresta

tropical do globo, é de fundamental importância.

Na maioria dos modelos globais de emissão, a área queimada é um dos principais parâmetros de entrada (Giglio et al., 2006). Estes modelos atestam o reconhecimento da importância da queima de biomassa no ciclo do carbono, na produção de gases traços e na emissão de aerossóis. A quantidade total de biomassa (combustível) consumida pelo fogo é comumente determinada através do modelo proposto por Crutzen et al. (1979) e Seiler e Crutzen (1980) (equação 1). Onde  $M$  é a massa de vegetação queimada em um dado intervalo de tempo,  $A$  é a área total queimada (superfície),  $B$  a densidade da biomassa (peso/superfície); e  $c$  a eficiência da queima (adimensional)

$$M = A.B.c \quad (1)$$

No entanto, a geração de produtos em escala regional/global de áreas queimadas não interessa apenas a estudos de modelagem de emissão dos GEE, mas também a estudos sobre a relação entre o regime de queimadas e o clima (Aragão et al., 2008), poluição atmosférica (Freitas, 2005), biodiversidade (Barlow et al., 2007), mudanças de cobertura (Shimabukuro et al., 2008), etc.

Contudo, há uma grande carência de produtos globais de áreas queimadas. Iniciativas de desenvolvimento de produtos globais de áreas queimadas baseadas em sensores orbitais já foram tomadas. Cita-se os produtos GLOBSCAR (Simon et al., 2004), GBA2000 (Tansey et al., 2004), e o MODIS burned area product (Justice et al., 2002; Roy et al., 2005). Porém, conforme Setzer et al. (2007) tanto o produto gerado pelo GLOBSCAR quanto pelo GBA2000 não apresentaram acurácia confiável. Ainda conforme Setzer et al. (2007) o produto gerado a partir dos dados MODIS estão restritas a estimativas de áreas localizadas em regiões utilizadas para testes de validação.

Com relação à detecção remota de focos de calor, já existe uma série temporal considerável disponível a comunidade. Cita-se a aplicação do sensor Along-Track Scanning Radiometer (ATSR) para identificação de focos de calor no período noturno (Arino e Rosaz, 1999), os dados oferecidos pelo portal do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais advindos de sensores como o Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), o produto global fire proveniente dos dados do sensor MODIS (Justice et al., 2002), o produto mensal de focos de calor desenvolvido por Giglio et al. (2003) através do uso do Visible and Infrared Scanner (VIRS). São características comuns a esses produtos de queimadas ativas de resolução espacial grosseira (próxima de 1 km x 1 km), informações sobre sua localização e horário de detecção.

Embora tais produtos representem bem muitos aspectos da distribuição espacial e temporal do fenômeno queimada, é tarefa difícil relacionar os focos de calor com a área realmente queimada numa superfície. Isso devido a sua inadequação de amostragem temporal, variabilidade nas condições dos combustíveis e da atmosfera, diferenças no comportamento da fonte de ignição, e questões relacionadas a resolução espacial do sensor utilizado (Schole et al., 1996; Eva e Lambin, 1998; Kasische et al., 2003; Giglio et al., 2006).

Desta forma, deixa-se evidente a necessidade de estudos que procurem diminuir as incertezas de estimativas de área queimadas para que se tenham cálculos mais robustos do volume de GEEs. É neste sentido que se propõe o desenvolvimento de um sistema de mapeamento de cicatrizes de queimadas na Amazônia legal a partir de dados MODIS, sensor que imagem em alta resolução temporal (quase diária) e em resolução espacial moderada (250 m).

Os avanços ofertados por tal estudo frente aos outros produtos de queimadas já citados é a capacidade de mapear ocorrências de áreas queimadas com dimensões mínimas de 6,25 ha em

intervalo quase diário e maior acurácia da estimativa, enquanto outras estimativas de áreas queimadas são da ordem de 100 ha. Com a possível implantação de tal sistema de detecção o Brasil poderá contar com uma robusta ferramenta de monitoramento de queimadas (semelhante ao sistema DETER), além de ter mapas de queimadas que darão maior confiabilidade as estimativas de emissão de GEEs.

## 2. Área de estudo

A área de estudo compreende todo o domínio das formações florestais considerado pelo projeto PRODES, o que equivale a uma superfície de aproximadamente 3,85 milhões de km<sup>2</sup>, ou quase 75% da Amazônia Legal. Todos os estados desta região, ou seja, Acre, Amazonas, Amapá, Maranhão, Mato Grosso, Rondônia e, Roraima, foram considerados neste trabalho (Figura 1).

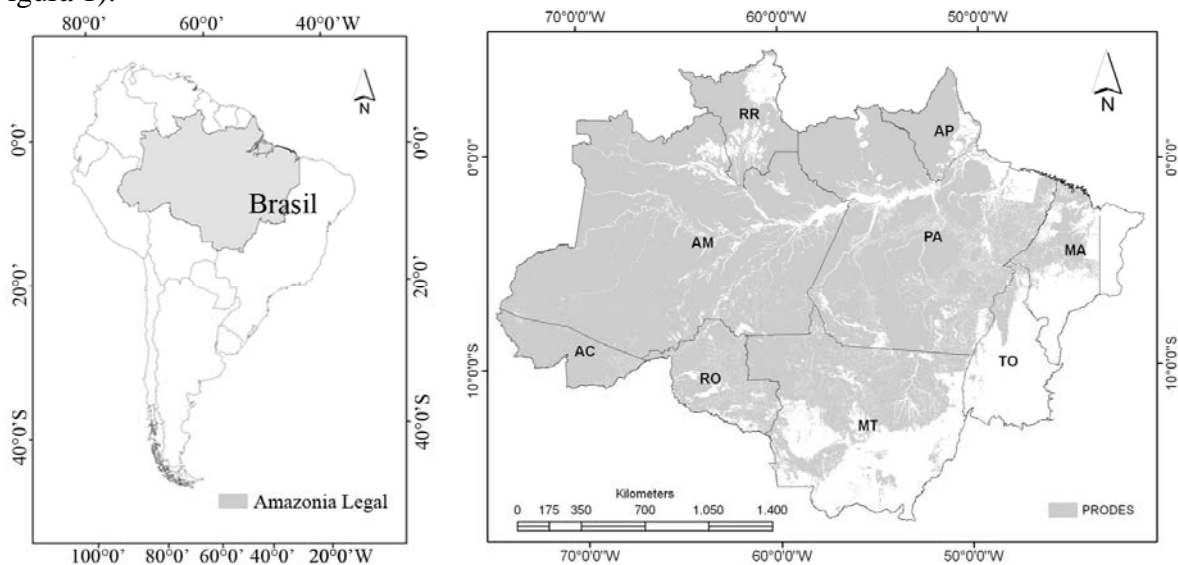


Figura 1. Localização da área de estudo.

Originalmente coberto, preponderantemente, por Florestas Ombrófilas e manchas de Floresta Estacional, os Estados da Amazônia Legal sofreram um intenso processo de conversão de sua cobertura natural para usos agropastoril a partir da década de 70. Foi um rápido processo de conversão de cobertura natural, dirigido pela crescente mecanização do campo (elemento da modernização da agricultura brasileira) e incentivos governamentais que contribuíram para a transformação de vastas extensões de terra em produtoras de grãos e criação de gado (HOGAN, 2002).

## 3. Dados de Sensoriamento Remoto

Foi gerado um banco de dados geográfico, na projeção Policônica/SAD69, em que a área de trabalho está entre as coordenadas geográficas 74° 05'W a 42° 30'W e 06° 00'N a 18° 00'S. Neste banco, foram inseridas as imagens MODIS utilizadas no mapeamento.

As imagens MODIS utilizadas foram as de refletância de superfície (Produto MOD09/TERRA, nível de processamento L2G ), bandas 1 (620-670 nm), 2 (841-876 nm) e 6 (1628-1652 nm); as duas primeiras bandas possuem resolução espacial de 250 m, já a última, 500 m (Justice, 2002).

A seleção das imagens foi baseada nos seguintes critérios: 1) período com maior detecção de focos de calor registrados pelo Programa PROARCO em cada Estado da Amazônia Legal. Desta maneira, os territórios estaduais foram utilizados como unidades de análise para a

determinação do período de queimadas (Figura 02); 2) disponibilidade de imagens livres de nuvens; 3) centralidade da área de interesse para evitar distorção panorâmica nas bordas das imagens.

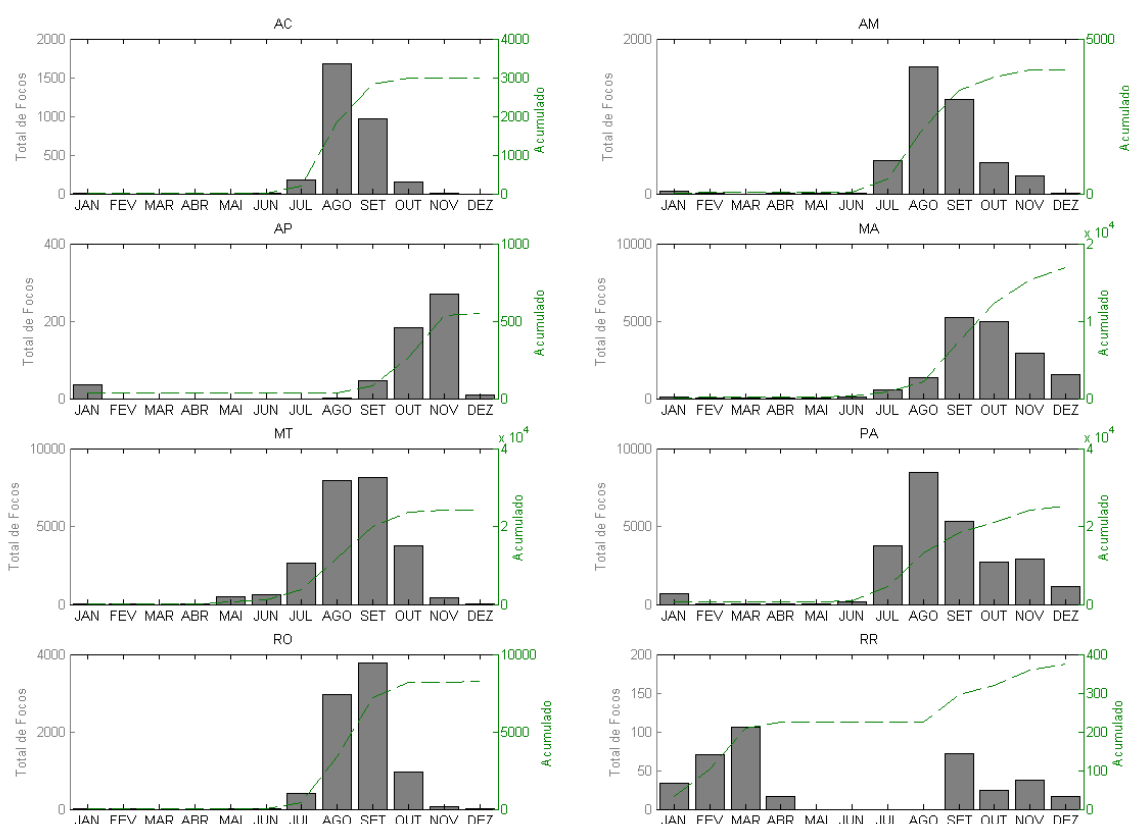


Fig. 02. Focos de calor detectados pelo sensor MODIS/AQUA no decorrer do ano de 2005 nos Estados monitorados pelo PRODES.

Fonte: PROARCO, <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>

A Tabela 1 apresenta o período e número de imagens selecionadas para a execução do mapeamento para o ano de 2005.

TABELA 1. Quantidade datas utilizadas no mapeamento das cicatrizes de queimadas ocorridas em cada Estado.

	AM*	AC	AP	MA	MT	PA	RO	RR
Jan.	-	-	-	-	-	-	-	01
Fev.	-	-	-	-	-	-	-	04
Mar.	-	-	-	-	-	-	-	05
Abr.	-	-	-	-	-	-	-	02
Mai.	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun.	-	-	-	-	-	-	-	-
Jul.	02	-	-	-	-	02	03	-
Ago.	05	-	-	-	5	05	05	-
Set.	03	-	-	-	11	06	10	-
Out.	03	-	4	-	7	03	7	-
Nov.	-	-	3	-	-	-	-	-
Dez.	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Os dados apresentados nas colunas dos Estados se referem a quantidade de datas avaliadas em cada mês.

#### 4. Procedimentos

O processamento digital das imagens MODIS para a identificação das cicatrizes de queimadas se baseou na metodologia aplicada no projeto PRODES digital (Shimabukuro et al., 1998). As etapas deste procedimento consistiram no uso do modelo linear de mistura espectral, na segmentação das imagens, na classificação não supervisionada por regiões e na edição da classificação.

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) foi aplicado no conjunto de bandas espectrais 1, 2 e 6, a fim de gerar a fração sombra, a qual realça os alvos de baixa refletância - caso das áreas queimadas - e reduz o volume de dados analisados.

A classificação das imagens fração sombra foi feita de forma não-supervisionada, por meio do algoritmo ISOSEG. Por se tratar de um classificador por região se fez necessária a segmentação da imagem fração-sombra, optando-se pelo método de crescimento por regiões a fim de gerar polígonos espectralmente homogêneos. No emprego desse segmentador definiram-se dois limiares: a) o limiar de similaridade, limiar mínimo abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e agrupadas em um único polígono; e b) o limiar de área, valor mínimo de área dado em número de pixels, para que uma região fosse individualizada. Os limiares empregados na segmentação foram 8 para similaridade e 4 para área. Estes limiares foram estipulados com base na complexidade de forma, de dimensão e pelos desvios de médias dos valores de nível de cinza apresentados por cicatrizes de queimadas.

Finalizada a segmentação, o passo subsequente foi criação de um arquivo de contexto, onde foram armazenadas as seguintes informações: a) tipo de classificação por regiões; b) bandas ou imagens utilizadas; e c) imagem segmentada. Em seguida extraíram-se os atributos estatísticos (médias e matrizes de covariância) do conjunto de regiões definido na fase de segmentação. Realizada a extração de regiões aplicou-se o classificador ISOSEG com limiar de aceitação de 75% de aceitação.

Após a classificação das imagens, foi feita a rotulação dos agrupamentos de pixels, que consistiu na associação dos agrupamentos representantes de áreas queimadas gerados a classe de mapeamento cicatrizes de queimadas .

Por fim, executou-se a edição manual do mapa gerado automaticamente, este minimizou os erros de inclusão e omissão inerentes à classificação automática de imagens, assegurando, assim, a confiabilidade do mapeamento.

A Figura 03 apresenta uma síntese metodológica da operacionalização do mapeamento das cicatrizes de queimadas executado no ambiente computacional do SIG SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) desenvolvido pelo INPE (<http://www.dpi.inpe.br/spring/>).

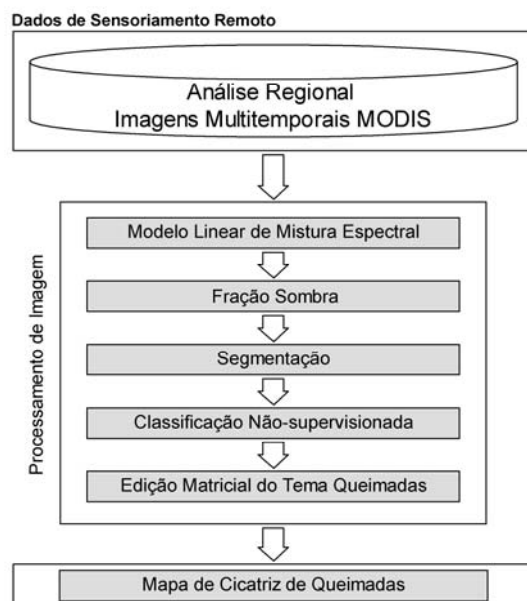


Fig. 03. Fluxograma do mapeamento de áreas queimadas.

## 5. Resultados

A área total mapeada de cicatriz de queimada foi de aproximadamente 50 mil km<sup>2</sup> para o ano de 2005. A espacialização das cicatrizes é apresentada na Figura 04.

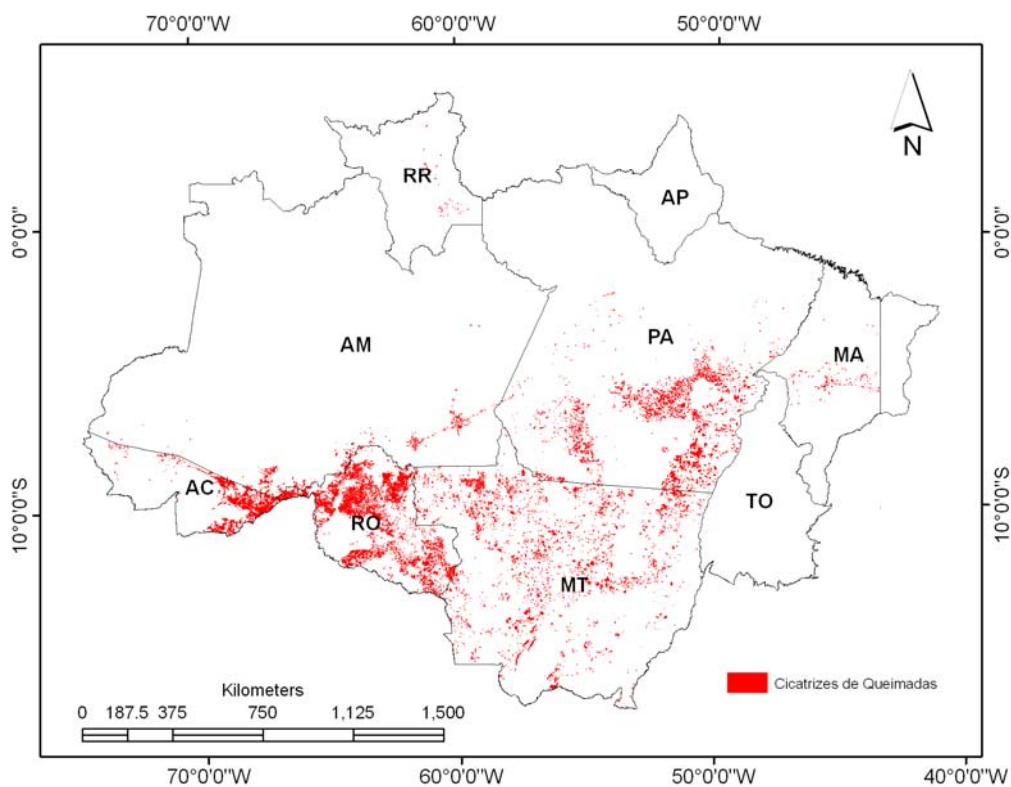


Fig. 04. Mapa de cicatrizes de queimadas ocorridas no ano de 2005.

Na Tabela 02 são mostradas as extensões das cicatrizes de queimadas detectadas nas áreas de atuação do PRODES em cada Estado da Amazônia Legal.

TABELA 02. Área total de queimadas mapeadas por Estado em 2005

Estado	Área Queimada – km <sup>2</sup>
Acre	7.112
Amapá*	0
Amazonas	2.061
Maranhão	380
Mato Grosso	10.772
Rondônia	15.232
Roraima*	74
Pará	12.887
<b>Total</b>	<b>48.518</b>

\* Estado com estimativa afetada pela alta presença de nuvens.

O uso de imagens fração-sombra provenientes de imagens de refletância diária do sensor MODIS se mostrou viável para o mapeamento de cicatrizes de queimadas na Amazônia brasileira. Além de ter bandas espectrais centradas em regiões propícias para a detecção de mudanças de cobertura, sua alta repetitividade de imageamento ameniza o principal entrave ao emprego do sensoriamento ótico na Amazônia, as nuvens.

## 6. Considerações Finais

Este trabalho apresenta a viabilidade de uma metodologia de mapeamento de queimadas a qual poderá servir de base para um futuro programa de detecção de queimadas na Amazônia (DETEQ). Sua futura implantação poderá reduzir as incertezas relacionadas ao cálculo de áreas queimadas em escala regional. Além disto, poderá fornecer informações quantitativas para melhor avaliar a contribuição do Brasil nas emissões de gases do efeito estufa causadas pela queima de florestas. Também poderá permitir a aplicação de políticas de monitoramento e fiscalização de queimadas ilegais na Amazônia.

## Referências Bibliográficas

- Aguiar, A.P.D.; Shimabukuro, Y.E.; Mascarenhas, N.D.A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, 20(4):647-657. 1999.
- Aragao, L. E. O. C.; Mallhi, Y. Barbier, N.; Lima, A. Shimabukuro, Y. Anderson, L.; Saatchi, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of Royal Society B**. 2008
- Arino, O.; Rosaz, J.: 1997 and 1998 world ATSR fire atlas using ERS-2 ATSR-2 data, **Proceedings of the Joint Fire Science Conference**, Boise, Idaho, 15–17 Junho 1999: Neuenschwander, L. F., Ryan, K. C., and Golberg, G. E., Boise: University of Idaho and the International Association of Wildland Fire, 177–182, 1999.
- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Anuária da Indústria Automobilística Brasileira**: Brasil 2007. Disponível em: [http://www.anfavea.com.br/anuario2007/Cap00\\_2007.pdf](http://www.anfavea.com.br/anuario2007/Cap00_2007.pdf). Acesso em 28 de novembro de 2007.
- Barlow, J.; Peres, C. A.; Henriques, L.M.P.; Stouffer, P.C. The responses of understory birds to Forest fragmentation, logging and wildfires: An Amazon synthesis. **Biological Conservation**. v. 128, p. 182-192. 2006.
- Crutzen, P. J.; Heidt, L. E.; Krasnec, J. P.; Pollock, W. H.; Selier, W. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>CL and COS. **Nature**, n.282, p.253-256. 1979.
- Eva, H.; Lambin, E. F. Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach. **Rem. Sens. Environ.** v. 64, p. 292–315. 1998.

- Freita, S. R.; Longo, K. M.; Silva Dias, M. A. F.; Silva Dias P. L. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos Avançados**. v. 19, p. 167-185. 2005
- Giglio, L.; Kendall, J. D.; Mack, R. A multi-year active fire data set for the tropics derived from the TRMM VIRS, **Int. J. Rem. Sens.** v.24, p. 4505–4525. 2003.
- Giglio, L.; Van Der Werf, G.; Randerson, J. T.; Collatz, G. J.; Kasibhatla. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 957-974. 2006.
- INSTITUTO NACIONAL de PESQUISAS ESPACIAIS – Divisão de Processamento de Imagens (INPE-DPI). SPRING, Manual do usuário. [on line], São José dos Campos, 1996. (E-mail:<http://www.inpe.br/spring>). 6 de Abril de 1999.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: Summary for Policymakers: Synthesis Report. Paris: **IPCC**. 26 p. 2007.
- Justice, C. O.; Giglio, L.; Korontzi, S.; Owens, J.; Morisette, J.; Roy, D., Descloitres, J.; Alleaume, S.; Petitcolin, F.; Kaufman, Y.: The MODIS fire products, **Remote Sensing of Environment**.. v 83, p. 244–262, 2002.
- Kasischke, E. S.; Hewson, J. H.; Stocks, B., Van der Werf, G.; Randerson, J.: The use of ATSR active fire counts for estimating relative patterns of biomass burning – a study from the boreal forest region. **Geophys. Res. Lett.** v. 30, p.1969-1977. 2003.
- MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Comunicação inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia. 274 p., 2004.
- Roy, D. P.; Lewis, P. E.; Justice, C. O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data – a bidirectional reflectance model-based expectation approach., **Rem. Sens. Environ.** v. 83, 263–286, 2002.
- Scholes, R. J.; Kendall, J. D.; Justice, C. O.. The quantity of biomass burned in southern Africa, **J. Geophys. Res.-Atmos.** v. 101, p.23667–23676. 1996.
- Sader, S.A.; Winne, J.C. RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics, **International Journal of Remote Sensing**, 13(16):3055-3067, 1992.
- Seiler, W.; Crutzen, P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. **Climate Change**, v.2, p. 207-247. 1980.
- Setzer, A.; Morelli, F.; Rivera-Lombardi, R. Estimativa quinzenal de áreas queimadas. In: **O sensor modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. Orgs. RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J. C. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007.
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, Jan. 1991.
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 67-74, Mar. 1995.
- Shimabukuro, Y. E.; Duarte, V.; Arai, E.; Freitas, R. M.; Lima, A.; Valeriano, D. M.; Brown, F.; Maldonado, M. L. R. **International Journal of Remote Sensing**. Aceito. 2008.
- Simon, M.; Plummer, S.; Fierens, F.; Hoelzemann, J. J.; Arino, O.. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification. **J. Geophys. Res.-Atmos.**v.109. 2004.
- Tansey, K.; Gregoire, J.-M.; Stroppiana, D.; Sousa, A., Silva, J.; Pereira, J. M. C.; Boschetti, L.; Maggi, M.; Brivio, P. A.; Fraser, R.; Flasse, S.; Ershov, D.; Binaghi, E.; Graetz, D.; Peduzzi, P.: Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. **J. Geophys. Res.- Atmos.** v.109, 2004.
- UNFCCC. Convenção de Clima das Nações Unidas. Disponível em: <http://www.unfccc.org>. Acesso em 28 de janeiro de 2008.