

## Determinação do coeficiente de combustão e do fator de combustão da vegetação da fitofisionomia do cerrado campo limpo com o uso da Energia Radiativa do Fogo

Greison Moreira de Souza<sup>1</sup>  
José Guilherme Fronza<sup>1</sup>  
Guilherme Augusto Verola Mataveli<sup>2</sup>  
Bruno Silva Oliveira<sup>1</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR)  
Avenida dos Astronautas, CEP: 12227-010. São José dos Campos SP, Brasil.  
{greison.souza; guilherme.fronza}@inpe.br  
{bruno.so; bete}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo – USP  
Departamento de Geografia  
Avenida Prof. Lineu Prestes, 338, CEP: 05508-000. São Paulo, SP, Brasil.  
mataveli@usp.br

**Abstract.** The aim of this study was to determine the combustion coefficient and combustion factor from a combustion laboratory experiment conducted with plant species collected in physiognomy of clean field of savanna biome in Sempre-Vivas National Park (PNSV). The plant material was exposed to the combustion process with samples different weights of 0.025; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25 and 0.5 kg at 7 samples for each biomass weight, counting the total of 42 measurements. After combustion of each sample of biomass that was not consumed, was collected for weighing. A thermal camera was used (FLIR A310) to measure the temperature of burning. After the experiment, in possession of the data collected by the thermal camera, they were processed for the Radiative Fire Power (FRP, MJ.s<sup>-1</sup>) and the radiative energy Fire (ERF, MJ). The combustion coefficient was 0.8263 kg.MJ<sup>-1</sup>, this value means that each 0.8263 kg of biomass burning in area under study, 1 MJ is released. In the experiment 85.5% of the biomass was consumed after the passage of fire, this value represents the factor of combustion.

**Palavras-chave:** biomass burning, fire radiative power, savanna, Sempre-Vivas National Park, queima de biomassa, potência radiativa do fogo, savana, Parque Nacional das Sempre-Vivas.

### 1. Introdução

Globalmente, as savanas estão entre os principais ecossistemas responsáveis pelas emissões de gases traços e aerossóis associados a queima de biomassa (Crutzen e Andreae, 1990). O Brasil desempenha um papel importante nessas emissões devido à grande cobertura vegetal do país e ao intenso processo de mudança de uso da terra que ocorre no bioma Cerrado, a savana brasileira (Fearnside, 2000).

As estimativas da quantidade de biomassa queimada e as respectivas emissões atmosféricas são complexas devido à alta frequência das queimadas e heterogeneidade dos ambientes tropicais. Com o avanço do monitoramento dos recursos terrestres por sensoriamento remoto, surgiram diversos métodos para a obtenção dessas estimativas, os quais permitem derivá-las de forma contínua, regular e sistemática ao longo do tempo em nível regional e/ou global (Kaiser et al. 2012).

Um método que vem sendo muito utilizado atualmente para estimar a biomassa queimada e as emissões a partir de sensores orbitais consiste no uso da energia radiativa emitida pelo fogo. Wooster (2002) empregou um espectroradiômetro de campo que opera na faixa do espectro solar para avaliar a relação entre a Energia Radiativa Fogo (ERF, MJ) e o total de biomassa vegetal queimada em um experimento de queima controlada e, então, encontrou correspondência linear de 0,78. Esse estudo provou a possibilidade do

uso da ERF para estimar as emissões de gases traços e aerossóis a partir da queima de biomassa.

Considerando os sensores orbitais, a energia emitida pelo fogo é traduzida pela Potência Radiativa do Fogo (FRP,  $\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ), que representa a taxa em que essa energia é emitida, enquanto a ERF pode ser determinada a partir da integração (somatória) temporal da FRP (Wooster et al. 2005; Pereira et al. 2012). A FRP tem sido amplamente empregada nos estudos de queima de biomassa para estimar emissões de gases traços e aerossóis, sendo que diversos trabalhos provaram a relação positiva da FRP com a quantidade de biomassa vegetal consumida por unidade de tempo (Kaufman et al. 1996; Wooster, 2002).

Para derivar a quantidade de biomassa total consumida e as emissões atmosféricas, faz-se necessário obter o coeficiente de combustão. Normalmente, os estudos realizam experimentos de queima em pequena escala para testar a relação entre a energia liberada durante o processo com a quantidade de biomassa que é conhecida, procedimento que permite, então, obter o coeficiente de combustão, que é específico para cada tipo de formação vegetal (Wooster et al. 2005; Freeborn et al. 2008; Pereira et al. 2012). Nesse experimento também é possível estimar o fator de combustão que é o percentual de biomassa eliminada após a passagem do fogo.

Segundo Palacio-Orueta et al. (2005), as medições laboratoriais e em campo dos parâmetros biofísicos da queima da biomassa permitem obter parâmetros locais mais fidedignos para serem utilizados nas estimativas de emissões, em vez de empregar valores genéricos.

Dessa forma, o escopo do presente estudo teve como objetivo determinar o coeficiente de combustão e o fator de combustão da fitofisionomia do cerrado campo limpo a partir de um experimento de combustão em laboratório realizado com espécies vegetais coletadas no Parque Nacional das Sempre-Vivas (PNSV), e, assim, subsidiar estudos futuros de estimativa de quantidade de biomassa queimada e emissões atmosféricas.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Câmera Termal

O instrumento utilizado para mensurar a temperatura da queima foi a câmera termal FLIR A310, fabricada pela empresa FLIR *Systems Incorporation*. O aparelho produz imagens de  $320 \times 240$  pixels, que resulta em imagens termais nítidas de 76800 pixels e a temperatura máxima detectada é de  $1200^\circ\text{C}$ . O aparelho atua na faixa espectral do infravermelho termal ( $7,5$  a  $13 \mu\text{m}$ ).

A FLIR A310 opera em 3 faixas de temperatura, entre  $-20^\circ\text{C}$  e  $120^\circ\text{C}$ , entre  $0^\circ\text{C}$  e  $350^\circ\text{C}$  e entre  $200^\circ\text{C}$  e  $1200^\circ\text{C}$ . Para o presente estudo foi considerado a faixa de temperatura de  $200^\circ\text{C}$  a  $1200^\circ\text{C}$ , faixa considerada adequada para experimentos de queima controlada, considerando que uma queimada pode atingir até  $1500 \text{ k}$  ( $\sim 1200^\circ\text{C}$ ). A calibração do instrumento nessa faixa não tem capacidade em discriminar temperaturas abaixo de  $80^\circ\text{C}$ , dessa forma, temperaturas abaixo de  $80^\circ\text{C}$  foram consideradas como *background*.

### 2.2 Experimento de combustão em pequena escala

Diferentemente do fator de combustão que é uma relação da quantidade de biomassa antes e depois do fogo, o coeficiente de combustão refere-se à quantidade de biomassa consumida para cada MJ liberado durante o processo de combustão. A estimativa do fator de combustão e coeficiente de combustão através da câmera termal foi realizada por meio de um experimento em pequena escala.

O experimento foi conduzido a partir do emprego da biomassa coletada em áreas de campo limpo no PNSV. Foram expostos ao processo de combustão amostras com pesos distintos de 0,025; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 e 0,5 kg com 7 amostragens para cada conjunto de peso de biomassa para a área de campo limpo, contabilizando o total de 42 medidas. Após a combustão de cada amostra de biomassa, o material que não foi consumido foi coletado para a pesagem e, assim, obter a quantidade de material queimado. Durante o período em que os experimentos foram desenvolvidos, utilizou-se uma estação meteorológica portátil para monitorar a velocidade do vento e caso houvesse muita interferência, a amostra seria descartada. Foram utilizadas caixas laterais no intuito de evitar a influência do vento durante as medições.

A Figura 1 ilustra a estrutura do experimento. A FLIR A310 foi posicionada a uma distância de 4,41 metros das amostras de biomassa vegetal. Os dados foram adquiridos com o uso de uma lente com IFOV de  $15^\circ$  a uma frequência de 5 Hertz (Hz). A câmera termal foi posicionada com o ângulo de visada ao nadir ( $0^\circ$ ).

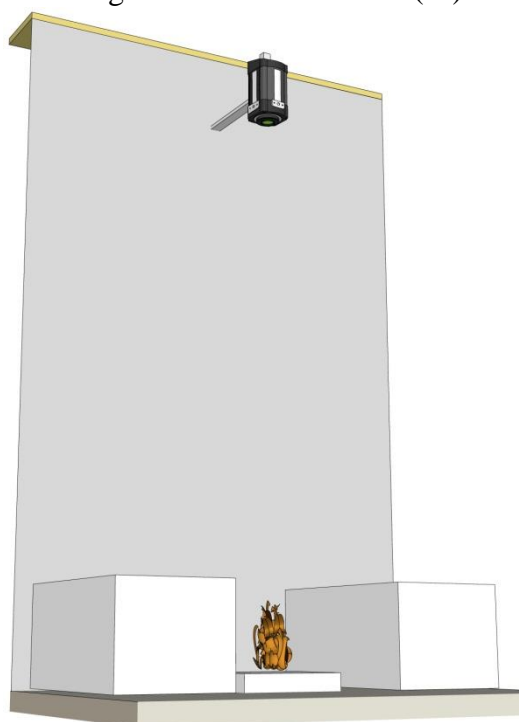


Figura 1. Estrutura montada para o experimento para determinar o fator de combustão e o coeficiente de combustão através do emprego da câmera termal.

Foi utilizada uma plataforma de cimento servindo como base para a biomassa com as dimensões de 77 x 60 x 7,5 cm. A temperatura da plataforma sempre era aferida para mantê-la abaixo de  $80^\circ\text{C}$ . Os dados gerados pela câmera termal durante o experimento de combustão em pequena escala foram processados através de uma rotina no *software* MATLAB desenvolvido pela *MathWorks*, tendo como variáveis de saída após o processamento a FRP e a ERF.

### 2.3 Estimativa da Energia Radiativa de Fogo a partir da câmera termal

Após a realização do experimento, em posse dos dados coletados pela câmera termal, os mesmos foram processados para obter a FRP e a ERF. A Equação 1 estima a taxa de energia emitida pela queimada (FRP) para cada pixel em cada frame, ou seja, cada instante de coleta do dado. A emissividade foi considerada igual a 1.

$$FRP_{pixel} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4_{pixel} \quad 1$$

em que,  $FRP_{pixel}$  é a potência radiativa do fogo para um determinado pixel (x,y) na matriz ( $MJ.s^{-1}$ );  $\varepsilon$  é a emissividade;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$ );  $T_{pixel}$  é a temperatura em cada pixel (k); e  $A$  representa a área de cada pixel ( $m^2$ ).

A Figura 2 ilustra o frame gerado pela câmera termal em cada instante de coleta. A FRP de todo o frame é a somatória da FRP de cada pixel. A  $FRP_{frame}$  pode ser calculada diretamente pela Equação 2 (Kaufman et al. 1996), conforme a Lei de Stefan-Boltzmann.

$$FRP_{frame} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^n A_n T^4_n \quad 2$$

em que,  $FRP_{frame}$  representa a potência radiativa do fogo ( $MJ.s^{-1}$ ) da matriz;  $A_n$  representa a área da  $n$ ésima componente ( $m^2$ ); e  $T_n$  é a temperatura (k) da  $n$ ésima componente.

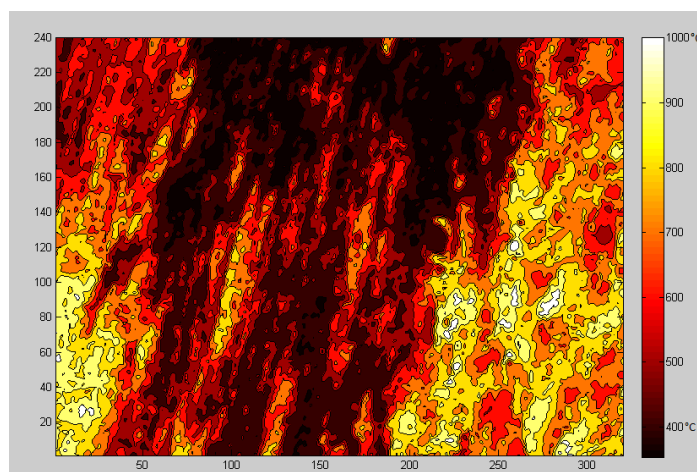


Figura 2. Representação do frame gerado pela câmera termal do experimento de queimada. Os pixels pretos apresentam temperatura inferior a  $80^{\circ}C$ , esses pixels serão desconsiderados na somatória da  $FRP_{frame}$ .

A ERF foi obtida por meio da Equação 3, a partir da FRP e seus respectivos horários de ocorrência para cada matriz. A Figura 3 exemplifica o procedimento para estimar a ERF, que é a integração da FRP do processo de combustão desde o início até o final.

$$ERF = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1}) \cdot \Delta t \quad 3$$

em que,  $ERF$  representa energia radiativa de fogo (MJ) para cada amostra;  $FRP_n$  é a potência radiativa de fogo na matriz  $n$  ( $MJ.s^{-1}$ );  $FRP_{n+1}$  ( $MJ.s^{-1}$ ) é a potência radiativa de fogo na matriz  $n+1$ ; e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as medições (s).

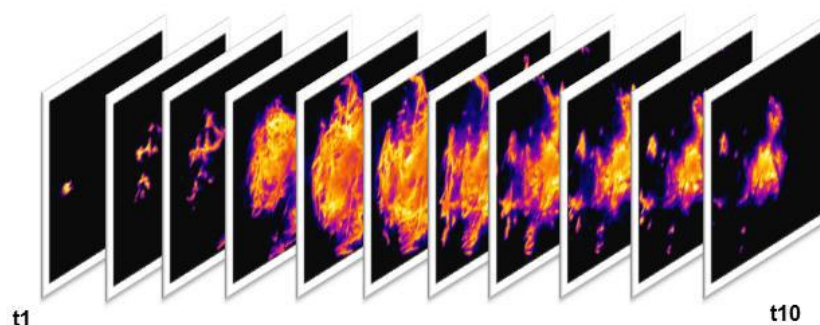


Figura 3. Representação da integração da  $FRP_{frame}$  do início ao final do processo de combustão ( $t_1...t_{10}$ ) para a obtenção da FRE.

Fonte: Mataveli (2014).

Os resultados foram avaliados com base nos coeficientes de determinação e de Pearson ( $R^2$  e  $r$ ) e a significância dos coeficientes de regressão por meio do teste  $t$ , de *Student*, em nível de significância de 5% de probabilidade.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 4 mostra a relação entre a quantidade total de biomassa disponível e a quantidade de biomassa efetivamente queimada. O valor encontrado foi de 0,855, isso elucida que 85,5% da biomassa na área de campo limpo foi consumida após a passagem do fogo. Os coeficientes de determinação e de correlação de Pearson ( $R^2=r=0,99$ ) mostraram correlação linear forte conforme o teste  $t$  com nível de significância de 0,05.

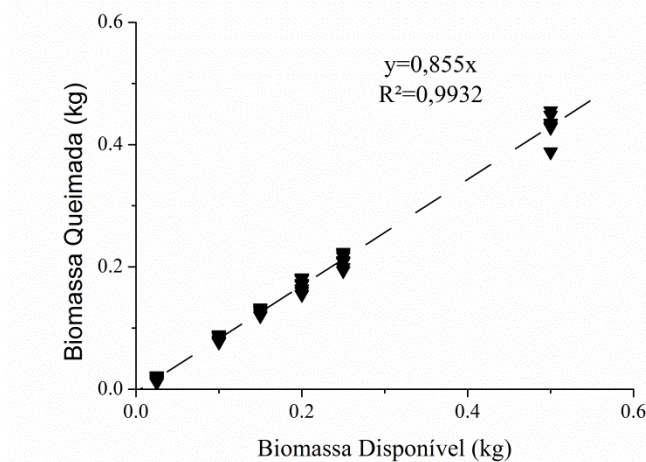


Figura 4. Regressão linear relacionando o total de biomassa disponível para a queima e a quantidade de biomassa efetivamente queimada.

O fator de combustão estimado no presente estudo (85,5%) está dentro da faixa de fatores de combustão disponíveis na literatura (81,9% a 100%) obtidos a partir de inventário florestal em áreas de campo limpo no cerrado brasileiro (Kauffman et al. 1994; Castro e Kauffman, 1998; Barbosa e Fearnside, 2005). Esse resultado mostra a robustez do método laboratorial que permite a condução do experimento de queimada a partir de uma pequena área, o que torna o método mais rápido e menos dispendioso. Diferente do inventário florestal que exige a realização de duas expedições de campo, inventário florestal antes e após o fogo, ainda, é necessário à condução da queimada em áreas



maiores em ambiente natural, que pode ser inviável por motivos financeiros, logísticos e por quantidade de recursos humanos.

A Figura 5 mostra a regressão linear entre a biomassa queimada e a ERF liberada durante o processo de combustão. É importante ressaltar que a biomassa total foi ponderada por 0,855, para que fosse utilizada apenas a biomassa consumida pela combustão.

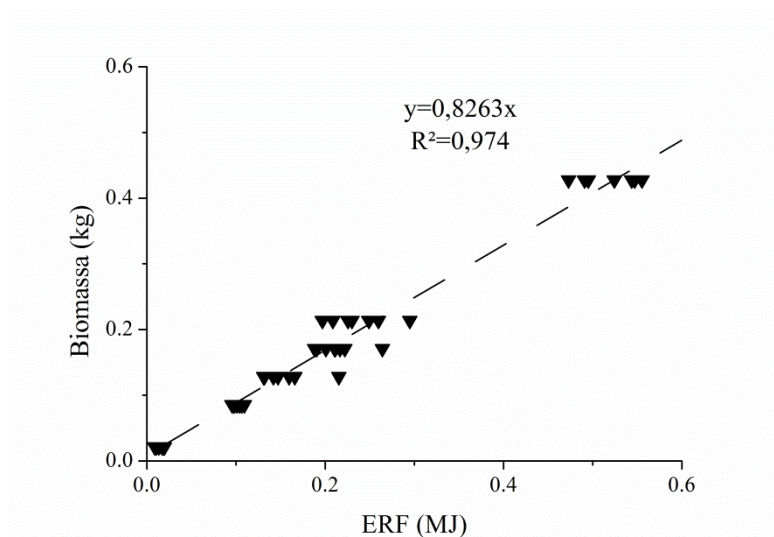


Figura 5. Regressão linear entre a biomassa total consumida e a ERF liberada durante o processo medida pela câmera termal FLIR A310.

O coeficiente de combustão foi de  $0,8263 \text{ kg.MJ}^{-1}$ , esse valor quer dizer que a cada  $0,8263 \text{ kg}$  de biomassa queimada na área de campo limpo em estudo,  $1 \text{ MJ}$  é liberado. Os coeficientes de determinação e de correlação de Pearson ( $R^2=r=0,98$ ) mostraram correlação linear forte conforme o teste t com nível de significância de  $0,05$ .

Wooster et al. (2005) utilizaram espectrorradiômetro para mensurar a radiância emitida pela queima controlada da espécie *Miscanthus* de região savânica, encontraram coeficiente de  $0,368 \text{ kg.MJ}^{-1}$ . Ao utilizar espécies de gramíneas comuns do Pantanal e pastagem em um experimento de queima em laboratório, Pereira et al. (2012) encontraram coeficiente de  $0,949 \text{ kg.MJ}^{-1}$ . Freeborn et al. (2008) coletaram material vegetal em áreas florestais dos Estados Unidos, obtiveram valores de  $0,453 \text{ kg.MJ}^{-1}$ . Mataveli (2014) encontrou coeficiente de  $0,57 \text{ kg.MJ}^{-1}$  em um experimento de combustão em pequena escala utilizando como biomassa a palha da cana-de-açúcar.

O monitoramento de queimadas e emissões por satélites do projeto *Monitoring Atmospheric Composition and Climate* (MACC) empregou o coeficiente de combustão de  $1,37 \text{ kg.MJ}^{-1}$  (Kaiser et al. 2012). Este coeficiente visava superar os valores subestimados de emissões atmosféricas quando se usa o coeficiente de Wooster et al. (2005) em dados de satélites. A partir das regressões lineares da ERF do *Global Fire Assimilation System* (GFAS) e as taxas de combustão do material vegetal seco do *Global Fire Emission Database* (GFED), o projeto MACC emprega coeficientes de combustão para oito tipos de cobertura da terra (Tabela 1).

Tabela 1. Classe de cobertura da terra usada no GFAS associado com o coeficiente de combustão do GFED.

Classe de cobertura da terra	Coeficiente de combustão (kg.MJ <sup>-1</sup> )
Savana	0,78
Savana com solo orgânico	0,26
Agricultura	0,29
Agricultura com solo orgânico	0,13
Floresta tropical	0,96
Turfa	5,87
Floresta extratropical	0,49
Floresta extratropical com solo orgânico	1,55

Fonte: Kaiser et al. 2012.

Em comparação com os coeficientes encontrados a partir de experimentos em regiões savânicas, o coeficiente de combustão do presente estudo (0,8263 kg.MJ<sup>-1</sup>) foi 5,9% e 124,5% maior que o coeficiente do projeto MACC (0,78 kg.MJ<sup>-1</sup>) e o estimado por Wooster et al. (2005) (0,368 kg.MJ<sup>-1</sup>), respectivamente, ao passo que o valor encontrado por Pereira et al. (2012) foi 14,8% maior que a do presente estudo.

#### 4. Conclusão

O fator de combustão encontrado foi de 85,5%, já o coeficiente de combustão foi de 0,8263 kg.MJ<sup>-1</sup>. Essas variáveis permitirão derivar estimativas de biomassa total consumida e emissões de queimadas em áreas de campo limpo do cerrado em escalas maiores.

#### 5. Agradecimento

Os autores agradecem ao Dr. Gabriel Pereira da Universidade Federal de São João Del-Rei por ceder o *script* para processar os dados da câmera termal.

#### Referências Bibliográficas

- Barbosa, R. I.; Fearnside, P. M. Fire frequency and area burned in the Roraima savannas of Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 204, n.371-384, 2005.
- Castro, E. A. & Kauffman, J. B. Ecosystem structure in the Brazilian cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, 14:263-283, 1998.
- Crutzen, P.J.; Andreae, M.O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, p. 1669-1678, 1990.
- Fearnside, P. M. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. **Climate Change**, v. 46, n. 1-2, p. 115-158, 2000.
- Freeborn, P. H.; Wooster, M. J.; Hao, W. M.; Ryan, C. A.; Nordgren, B. L.; Baker, S. P.; Ichoku, C. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D1, 2008.
- Kaiser, J. W.; Heil, A.; Andreae, M. O.; Benedetti, A.; Chubarova, N.; Jones, L.; Morcrette, J. J.; Razinger, M.; Schultz, M. G.; Suttie, M.; Van Der Werf, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. **Biogeosciences**, v.9, n.1, p. 527-554, 2012.
- Kauffman, J.B. Cummings, D.L. & Ward, D.E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. **Journal of Ecology**, 82, 519-531, 1994.

Kaufman, Y. J.; Remer, L.; Ottmar, R.; Ward, D.; Rong-R, L.; Kleidman, R.; Fraser, R.; Flynn, L.; Mcdougal, D.; Shelton, G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: Levine, J. (Ed.), **Global Biomass Burning**, Maryland: MIT Press, p. 685-696, 1996.

Mataveli, G. A. V.; Oliveira, B. S.; Pereira, G.; Moraes, E. C.; Cardozo, F. S. Dinâmica dos focos de queimada em cana-de-açúcar no estado de São Paulo entre 2008 e 2011. **Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 66, p. 379-392, 2014.

Palacios-Orueta, A.; Chuvieco, E.; Parra, A.; Carmona-Moreno, C. Biomass burning emissions: a review of models using remote sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.104, p.189-209, 2005.

Pereira, G.; Cardozo, F. S.; Silva, F. B.; Moraes, E. C.; Ferreira, N. J.; Freitas, S. R.; Shimabukuro, Y. E.; Breunig, F. M.; Viana, D. R. Determinação e modelagem da taxa de consumo de biomassa queimada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, p. 13-22, 2012.

Wooster, M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires. **Geophysical Research Letters**, v.29, n.21, p. 23-1-23-4, 2002.

Wooster, M. J.; Roberts, G.; Perry, G.; Kaufman, Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research**, v.110, n. D24, p. 83-107, 2005.