

## Determinação do coeficiente de biomassa consumida com o uso da energia radiativa do fogo a partir da queima da palha da cana-de-açúcar

Guilherme Augusto Verola Mataveli<sup>1</sup>  
Bruno Silva Oliveira<sup>1</sup>  
Gabriel Pereira<sup>1</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{mataveli, bruno.so, gabriel, bete}@dsr.inpe.br

**Abstract.** Sugarcane cultivation is one of the most important agricultural activities in Brazil, and is developed since sixteenth century. The production of sugarcane is showing nowadays a rapid expansion, mainly due to the growth of ethanol production, especially over areas of conventional crops. Sugarcane straw burning causes several impacts that affect soil and crop productivity. Thus remote sensing products have been used as an information source for estimation of burned vegetation and emissions released during the combustion process. The objective of this study is to use fire radiative power (FRP) and fire radiative energy (FRE) to estimate the amount of biomass consumed in sugarcane straw burning, through a small-scale combustion experiment occurred in Radiometry Laboratory of the National Institute for Space Research. The multiplicative coefficient determined with the thermal camera was  $0.534 \text{ kg.MJ}^{-1}$ , with a correlation greater than 90% (significant at 0.05 level by student t-test) and approached the results obtained in other similar experiments, even the three small-scale experiments used as a reference be conducted with different plant species. The relationship found was combined with orbital remote sensing data to estimate consumed biomass by fires in the areas of sugarcane in São Paulo State, and it is expected to use results found to estimate biomass consumed in Brazil and South America in the future.

**Palavras-chave:** fire radiative energy, sugarcane, biomass burned coefficient, energia radiativa do fogo, cana-de-açúcar, coeficiente de biomassa consumida.

### 1. Introdução

O plantio da cana-de-açúcar é uma das atividades agrícolas mais importantes do Brasil, sendo esta cultivada desde meados do século XVI. A produção da cana-de-açúcar possui uma dinâmica de expansão acelerada, principalmente devido ao crescimento da produção de etanol. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e maior exportador de etanol e açúcar do mundo (Aguiar et al., 2007). Devido ao interesse em diminuir a dependência pelos combustíveis fósseis e a preocupação ambiental global, o uso do etanol está tomando proporções mundiais, o que estimula a expansão do cultivo da cana-de-açúcar (Aguiar et al., 2009).

Apesar dos avanços tecnológicos e da expansão do cultivo, ainda é praticado a queima da palhada da cana-de-açúcar em grande parte das plantações como uma maneira de facilitar o seu corte. O hábito das queimadas na agricultura ocasiona diversos impactos no solo, como aumento a susceptibilidade à erosão, redução das substâncias necessárias à nutrição das plantas, perda de espécies da fauna e da flora, redução da fertilidade e queda na produtividade das lavouras, além de ocasionar aumento dos gases de efeito estufa e poluentes na atmosfera (Pereira et al., 2009).

As informações obtidas por meio de sensoriamento remoto nos níveis orbital, aéreo e terrestre foram utilizadas durante muito tempo apenas para identificar e monitorar focos de queimadas e não apresentavam estimativas eficazes da quantidade de vegetação queimada e das emissões liberadas durante o processo de combustão (Wooster et al., 2003).

Embora os estudos voltados para quantificar as emissões provenientes da queima de biomassa através de imagens de satélites tenham crescido desde a última década, ainda existem incertezas tanto nos dados de entrada quanto na aplicação das metodologias

utilizadas, o que pode gerar erros até 50% nos valores estimados (Vermonte et al., 2009). De acordo com Pereira et al (2012), entre as principais fontes de erros nas estimativas pode-se mencionar a umidade do solo e o conteúdo de água no interior da planta, a área total queimada, os fatores de emissão para cada espécie e a generalização de diversos fatores para grandes áreas. Considerando essas incertezas, Kaufman et al. (1996) introduziram o conceito de energia radiativa do fogo (ERF), que permite a geração de dados orbitais possíveis de serem relacionados diretamente com a intensidade do fogo e com o total de vegetação consumida por unidade de tempo. Wooster et al (2003) definem a ERF como a parte da energia química liberada na queima de biomassa emitida como radiação eletromagnética no processo de combustão; cabe ainda ressaltar a diferença entre a ERF, anteriormente definida, e a potência radiativa do fogo (FRP). De acordo com Pereira et al. (2011), a FRP é a taxa na qual a energia, na forma de radiação eletromagnética, é emitida pelo fogo.

O objetivo do presente trabalho é determinar o coeficiente de biomassa consumida com o uso da energia radiativa do fogo a partir da queima da palha da cana-de-açúcar e estimar a partir de informações extraídas de imagens de satélite a quantidade de biomassa consumida no Estado de São Paulo para os anos de 2009, 2010 e 2011.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Descrição do experimento

O experimento para medir a radiância espectral da queima da palha de cana-de-açúcar e a ERF foi realizado no dia 31 de julho de 2012 nas proximidades do Laboratório de radiometria do INPE durante o período noturno, de forma a excluir a influência e interferência da radiação solar no sinal coletado. No experimento, inicializado às 19 h, as condições meteorológicas eram predominantemente de céu nublado com a temperatura do ar de 18°C e umidade relativa de 83%.

A estrutura do experimento é apresentada na Figura 1. Para posicionar o equipamento destinado a medir a temperatura e calcular a ERF, montou-se um andaime com aproximadamente 3 metros de altura (a). Nesta plataforma, posicionou-se a câmera termal FLIR A310 (b) a uma distância de 2,77 metros das amostras de biomassa vegetal prontas para o processo de combustão (c).

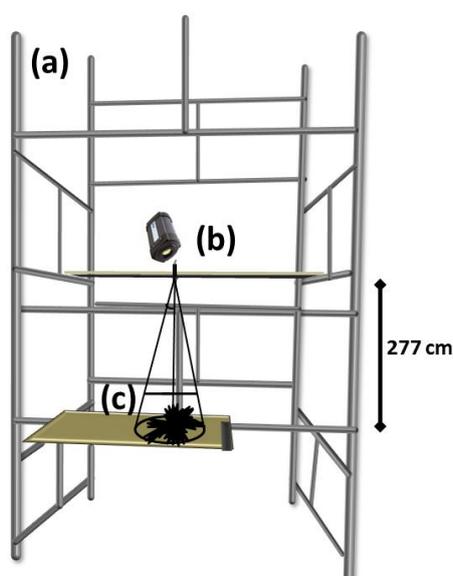


Figura 1. Estrutura montada para o experimento.

Foram expostos ao processo de combustão dois tipos diferentes de palha de cana-de-açúcar: palha seca e palha verde, objetivando a simulação dos possíveis estágios da palhada

submetida à queima em ambiente natural. No total realizaram-se 30 amostragens com pesos variando entre 0,025 Kg e 0,150 Kg, dos quais 25 amostras foram de palha seca e 5 amostras de palha verde. No caso da palha verde, as amostras foram coletadas 45 dias antes da realização do experimento de forma que estas perdessem grande parte da umidade presente em sua estrutura e, deste modo, reproduzissem os padrões encontrados na natureza. A palha seca foi coletada 4 dias antes do experimento em uma área de cultivo de cana-de-açúcar, onde a colheita da produção ocorreu de maneira mecânica.

## 2.2 Descrição do equipamento

A câmera termal utilizada no experimento para medir a temperatura e a partir dela obter a FRP e a ERF é fabricada pela empresa *FLIR Systems Incorporation*. O modelo utilizado, A310, possui um IFOV de 30°, resolução de 320x240, totalizando 76800 *pixels* em cada cena adquirida, e temperatura máxima detectada de 1200° C. A faixa do espectro eletromagnético em que o instrumento opera é de 7,5µm a 13µm (Manual da Flir, 2012).

## 2.3 Metodologia para a estimativa da Energia Radiativa de Fogo a partir da câmera termal

A taxa na qual a energia, na forma de radiação eletromagnética, é emitida pelo fogo, ou a potência radiativa do fogo liberada no processo de combustão para cada *pixel* presente em cada uma das matrizes, ou *frames*, geradas pela câmera termal pode ser calculada a partir da Equação 1. Cabe ressaltar que os *pixels* com temperatura inferior a 80°C, ou seja,  $FRP = 8,453 \cdot 10^{-6} \text{ MJ} \cdot \text{s}^{-1}$ , foram desconsiderados para esse cálculo, uma vez que não se tratavam de *pixels* com presença de queimada. Neste experimento, dado o IFOV e a altura de instalação da câmera termal a área de cada *pixel* foi de  $3,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ .

$$FRP_{(x,y)} = \sigma \cdot T_{(x,y)}^4 \cdot A \quad (1)$$

em que FRP representa a potência radiativa do fogo para uma determinada posição x,y na matriz ( $\text{MJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ), A representa a área fracional ( $\text{m}^2$ ) de cada *pixel* e T é a temperatura (K) para um determinada posição x,y.

Para o cálculo FRP total de cada matriz foi utilizada a Equação 2.

$$FRP_{total} = \sigma \cdot A \cdot \sum_{i=1}^n T_n^4 \quad (2)$$

em que  $FRP_{total}$  representa a potência radiativa do fogo ( $\text{MJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ) da matriz,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) e  $T_n$  é a temperatura (K) da *n*ésima componente.

Com base nos valores de FRP e seus respectivos horários de ocorrência para cada matriz, a ERF foi calculada pela Equação 3.

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

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

## 3. Resultados e Discussão

Visando estimar a ERF a partir dos dados da câmera termal, foi obtida a potência radiativa do fogo (FRP) em cada *frame* coletado pelo equipamento. A curva apresentada na

Figura 2 mostra a FRP ao longo do tempo para uma amostra de 50 gramas de palha seca, como exemplo.

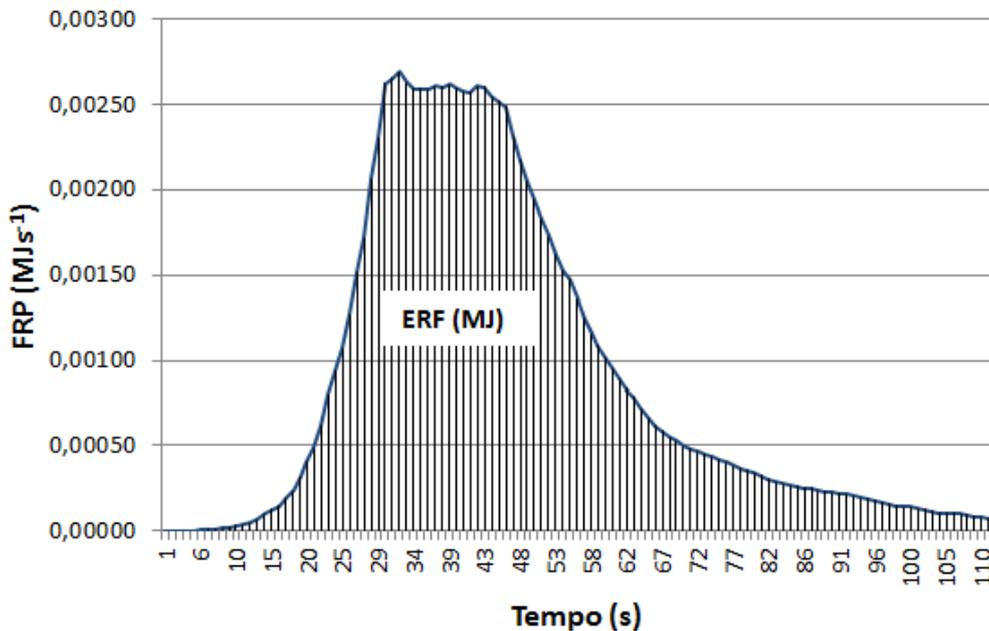


Figura 2. Potência radiativa do fogo (FRP) de uma amostra de 50 gramas ao longo do tempo.

Nota-se que nos segundos iniciais do experimento a FRP é próxima de zero, e isso é devido ao período entre o início da coleta de dados pela câmera termal e início do espalhamento do fogo na amostra, que, quando ocorre, eleva a FRP rapidamente. Após um período de liberação de energia aproximadamente constante, entre 31 e 48 segundos, a FRP decai, pois diminui a quantidade de biomassa a ser consumida e inicia-se o estado de brasa na amostra. A área hachurada abaixo da curva representa a integração dos valores de FRP para todas as medições de uma amostra e essa integração consiste na energia radiativa do fogo. Os resultados da relação entre a biomassa e a ERF liberada são apresentados na Figura 3.

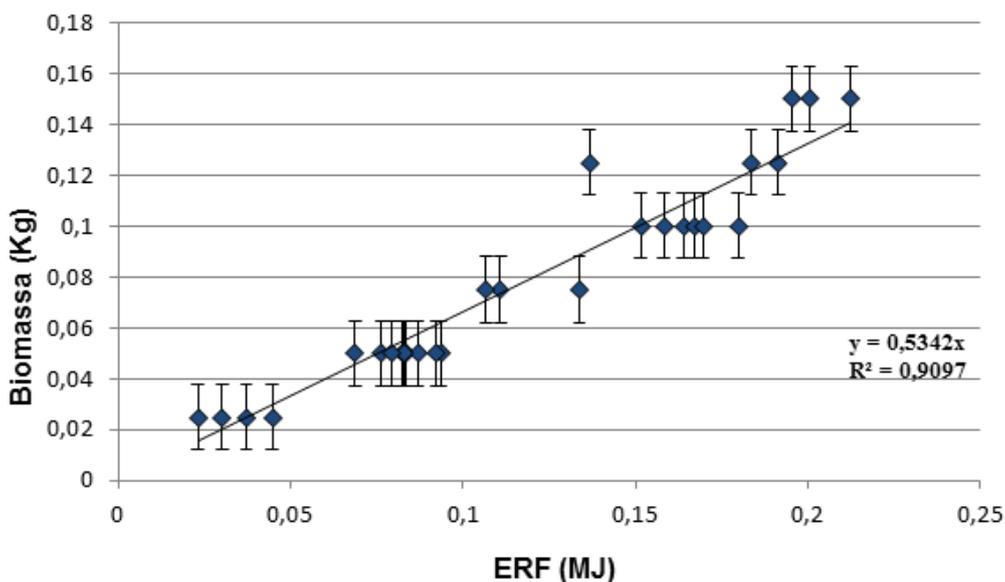


Figura 3. Regressões lineares relacionando o total de biomassa consumida e a ERF.

Segundo Pereira et al. (2012), são encontrados na literatura alguns coeficientes que permitem estimar o total de biomassa consumida na queimada ao multiplicá-los pela ERF, como os obtidos por Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008). Utilizando os dados da câmara termal, o coeficiente obtido para estimar o total de biomassa consumida foi de  $0,534 \text{ kg.MJ}^{-1}$ . A correlação existente entre a biomassa e a ERF foi de 95%, uma vez que o conjunto de dados tratados apresentou um coeficiente de determinação de aproximadamente 0,91 (significativo de acordo com o teste t de student com  $\alpha=0,05$ ). Em um experimento de combustão de pequena escala semelhante, porém utilizando diferentes espécies vegetais, Pereira et al. (2012) obtiveram um coeficiente de multiplicação de  $0,949 \text{ kg.MJ}^{-1}$ , Wooster et al (2005) encontraram um coeficiente de  $0,368 \text{ kg.MJ}^{-1}$  e Freeborn et al (2008) chegaram ao coeficiente de  $0,453 \text{ kg.MJ}^{-1}$ .

De acordo com o coeficiente obtido neste experimento para cada MJ liberado na queima da palha da cana,  $0,534 \text{ kg}$  de biomassa era consumido. Assim, a relação entre a biomassa consumida e a ERF liberada na queima da palha da cana é expressa na Equação 4.

$$BC = 0,534 * ERF \quad (4)$$

em que BC é a quantidade de biomassa consumida, em kg, e ERF é a energia radiativa do fogo, em MJ.

Cabe destacar que os valores de biomassa apresentados na regressão estão multiplicados pelo fator de combustão da palha da cana-de-açúcar. Nesse estudo foi utilizado como fator de combustão da palha da cana 0,8, mesmo valor utilizado por Figueiredo et al (2010) para estimar a emissão de gases do efeito estufa associados à produção de cana-de-açúcar.

O coeficiente obtido foi combinado com dados do GOES e do MODIS e aplicado ao Estado de São Paulo a fim de estimar a quantidade de biomassa queimada anualmente para os anos de 2009, 2010 e 2011 em uma grade regular de 20 Km. A Figura 4 apresenta as estimativas obtidas para 2009, Figura 4(a), para 2010, Figura 4(b), e para 2011, Figura 4(c). Os valores obtidos estão em  $\text{Kg.m}^{-2}$ .

As localidades do Estado de São Paulo que apresentaram as maiores queimas de biomassa foram as macro regiões de Presidente Prudente, Marília, Araçatuba e São José do Rio Preto, Barretos, Franca, Ribeirão Preto e Central, com consumo superior a  $12 \text{ Kg/m}^2$ .

Nota-se que as maiores quantidades de biomassa queimada encontram-se, em todos os anos abordados, na região do Estado onde está localizada a maior quantidade de cultivos de cana-de-açúcar, ou seja, na região norte de São Paulo. De acordo com o projeto Canasat (2012), os municípios no norte do Estado apresentaram maior expansão da cultura entre 2003 e 2011, destacando-se o município de Barretos. No período entre 2003 e 2011 Barretos apresentou um aumento de área plantada de 48.825 ha, sendo o município com maior crescimento de cultivo de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo (24.843 ha em 2003 e 75.401 ha em 2011).

Observa-se ainda uma quantidade considerável de biomassa queimada na região oeste do Estado, também associada aos cultivos de cana-de-açúcar, assim como uma estimativa elevada na área correspondente à Grande São Paulo em relação ao seu entorno. O valor total queimado no ano chegou a 4,8 Gg, o que é um valor considerável apesar de ser menor do que outras áreas onde ocorrem queimadas com mais frequência, como o bioma Amazônia.

Visando acabar com a prática das queimadas na agricultura no estado de São Paulo, em 2002 foi aprovada a Lei Estadual no 11.241, que estipulou um cronograma para a eliminação da prática da queima nos canaviais a partir desse mesmo ano, com prazo final previsto para 2021 para áreas de colheita mecanizáveis e para 2031 para áreas não mecanizáveis. Com o intuito de acelerar o processo de diminuição dessa queima, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA)

firmaram, em agosto de 2007, um protocolo de intenções em que a prática da queima da palha da cana-de-açúcar deve ser gradativamente reduzida até sua completa eliminação em 2017 para áreas não mecanizáveis e até 2014 em áreas mecanizáveis (Ronquim, 2007). A metodologia apresentada neste estudo pode ser aplicada futuramente de forma a verificar e monitorar o cumprimento dessa lei.

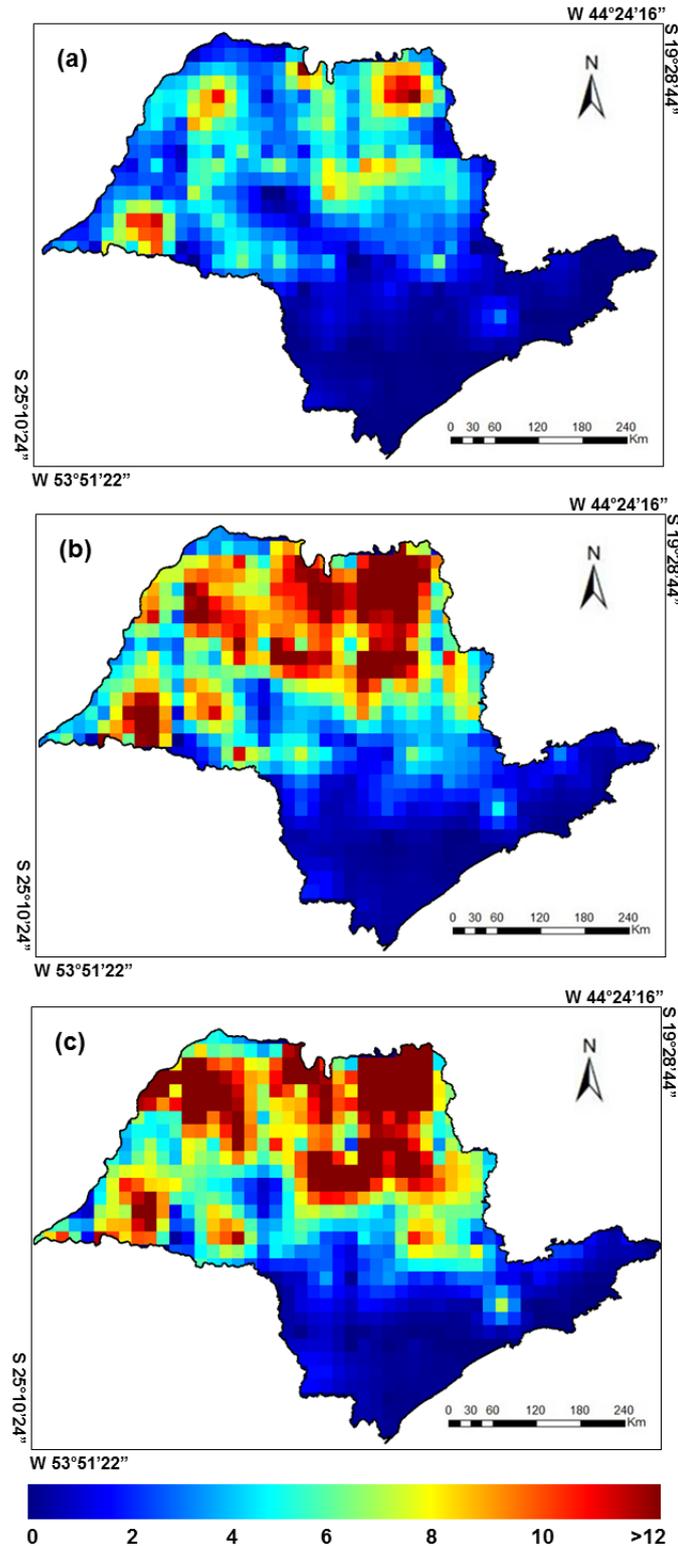


Figura 4. Estimativa de biomassa queimada no Estado de São Paulo nos anos de 2009 (a), 2010 (b) e 2011 (c).

#### 4. Conclusões

A metodologia aplicada com a câmera termal mostrou-se eficiente na obtenção do coeficiente multiplicativo da estimativa de biomassa consumida, visto que apresentou um coeficiente de determinação de 0,91. A alta correlação encontrada entre a biomassa consumida e a ERF foi possível devido à possibilidade de restrição, em cada medida, das áreas em que efetivamente a queimada ocorria, permitindo assim uma determinação mais precisa da FRP em cada amostra. O coeficiente multiplicativo obtido se aproximou dos apresentados na literatura, mesmo sendo os experimentos de pequena escala realizados com espécies vegetais distintas.

A aplicação deste coeficiente multiplicativo na ERF extraída do GOES e MODIS para o Estado de São Paulo permitiu estimar a quantidade de biomassa consumida em 2009, 2010 e 2011. O máximo valor total anual de biomassa consumida no Estado foi 4,8 Gg registrado em 2011, sendo que grande parte da biomassa queimada refere-se a áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Através destas estimativas se verifica o grande crescimento deste cultivo nas regiões norte e oeste do Estado.

#### Referências Bibliográficas

- Aguiar, D.A.; Silva, W. F.; Feitosa, F. F.; Gonçalves, F. G.; Rizzi, R.; Rudorff, B. F. T. Análise espacial da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: a influência da precipitação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2007. p. 2231-2238. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.15.15.48/doc/2231-2238.pdf>>. Acesso em 30 out. 2012.
- Aguiar, D. A.; Adami, M.; Rudorff, B. F. T.; Sugawara, L. M.; Freitas, R. M. Avaliação da conversão do uso e ocupação do solo para cana-de-açúcar utilizando imagens de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5547-5554. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.15.20/doc/5547-5554.pdf>>. Acesso em 01 nov. 2012
- Canasat: **mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da terra**. São José dos Campos, 2012. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/index.html>> Acesso em: 02 de nov. de 2012.
- Figueiredo, E. B.; Panosso, A. R.; Romão, R.; La Scala Junior, N. Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 05, n.03, 2010.
- 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. 01, 2008.
- Kaufman, Y. J.; Remer, L.; Ottmar, R.; Ward, D.; Rong, 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. (Org.). **Global biomass burning**, Maryland: Editora MIT, 1996. p. 685-696
- Manual da FLIR. Disponível em: <<http://www.flir.com/BR/>>. Acesso em 28 out. 2012.
- Pereira, G.; Cardozo, F. S.; Moraes, E. C.; Prado, B. R.; Silva, G. B. S.; Arai, E. Estudo preliminar do impacto do cultivo da cana-de-açúcar: alterações no albedo e liberação de energia radiativa através das queimadas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2009. p. 325-332. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.30/doc/325-332.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2012.
- Pereira, G.; Shimabukuro, Y. E.; Moraes, E. C.; Freitas, S. R.; Cardozo, F. S.; Longo, K. M. Monitoring the transport of biomass burning emission in South America. **Atmospheric Pollution Research**, v. 2, p. 247-254, 2011.

Pereira, G., Cardozo, F. S.; Silva, F. B.; Moraes, E. C.; Ferreira, N. J.; Freitas, S. R.; Shimabukuro, Y. E.; Breuning, F. B.; 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

Ronquim, C. C. Queimada na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos. Embrapa monitoramento por Satélite, 2010.

Vermonte, E.; Ellicott, E.; Dubovik, O.; Lapionok, T.; Chin, M.; Giglio, L.; Roberts, G.J. An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power. **Journal of geophysical research**, v. 114, 2009.

Wooster, M. J.; Zhukov, B.; Oertel, D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 83-107, 2003.

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. 01, 2005.