

Análise da radiação espectral, da potência radiativa do fogo e da energia radiativa do fogo emitida pela queima da palha da cana-de-açúcar a partir de experimento de combustão em pequena escala

Guilherme Augusto Verola Mataveli¹
Bruno Silva Oliveira¹
Gabriel Pereira¹
Elisabete Caria Moraes¹

¹ 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. Land use and land cover are a reflection of the economic activities thus agricultural activity is strongly influenced by this situation. Brazil stands as the largest producer and exporter of sugar and ethanol in the world, with an increased demand and need for crop expansion, especially due to the use of ethanol produced from sugarcane be taking global proportions. Despite sugarcane expansion and technological advances, it is still possible to notice straw burning as a way to facilitate the harvest in most 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 analyze the spectral radiance, fire radiative power (FRP) and fire radiative energy (ERF) emitted by sugarcane straw burning through a small-scale combustion experiment in Radiometry Laboratory of the National Institute for Space Research. With the results obtained, it is expected in the future to obtain the multiplicative coefficient of biomass consumed using fire radiative energy and adapt it to orbital data to estimate the biomass consumed in sugarcane burned areas for the State of São Paulo, Brazil.

Palavras-chave: radiance, fire radiative power, fire radiative energy, sugarcane, radiação, potência radiativa do fogo, energia radiativa do fogo, cana-de-açúcar.

1. Introdução

As mudanças ambientais vêm causando inúmeras preocupações na humanidade. Sabe-se há algum tempo que as atividades antrópicas afetam de maneira direta os sistemas terrestre e atmosférico, especialmente no que tange às mudanças no uso e cobertura da terra (Liu et al., 2008). O uso e a cobertura da terra são um reflexo das atividades econômicas desenvolvidas pela sociedade, e assim a atividade agrícola é fortemente influenciada por essa situação (Pereira et al., 2006 e 2012).

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o maior produtor de cana-de-açúcar e maior exportador de açúcar e álcool do mundo (Aguiar et al., 2007). O Estado de São Paulo é o principal produtor nacional, sendo que na safra 2011/2012 São Paulo foi responsável pelo plantio de cerca de 5 milhões e 400 mil hectares de cana (Canasat, 2012).

Devido ao interesse mundial em diminuir a dependência pelos combustíveis fósseis e com isto preservar a qualidade ambiental, o uso do etanol tem aumentado e com isto estimulado a expansão do cultivo da cana-de-açúcar (Aguiar et al., 2009). A crescente demanda de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, especialmente após o ano de 2003 com a popularização dos carros bicombustíveis no Brasil, causou uma rápida expansão dessa cultura nos últimos anos (Rudorff et al., 2010). Esse aumento da demanda mundial por biocombustíveis, incluindo o etanol da cana-de-açúcar, exige a conversão de áreas de culturas convencionais em áreas de cultivo de cana (Loarie et al., 2011).

Durante a colheita da cana-de-açúcar é comum utilizar a queima da palhada para facilitar o corte. Esta prática ocasiona diversos impactos tanto na atmosfera, como

emissão de gases do efeito estufa e aerossóis, quanto na superfície, como aumento a susceptibilidade à erosão, redução das substâncias necessárias à nutrição das plantas, perda de fertilidade e, devido aos fatores citados anteriormente, queda na produtividade das lavouras (Pereira et al., 2009).

As queimadas podem ser caracterizadas espectralmente na região do visível (0,4 μ m a 0,7 μ m) pelo aumento ou diminuição da reflectância espectral dependendo da cobertura do solo anterior à queimada, que interfere diretamente no sinal captado pelo sensor. Para a identificação de queimadas, essa faixa espectral não é a mais indicada, por possibilitar a confusão com outros alvos que refletem pouco no visível, como corpos d'água, sombras de nuvens e certos tipos de solo, que podem apresentar uma similaridade espectral. (França, 2004). A faixa espectral do infravermelho próximo é a mais adequada para a identificação e o mapeamento de cicatrizes de queimada, pois ao ocorrer a queima de biomassa, a energia refletida pelas plantas diminui, devido à redução de interação da radiação eletromagnética com a folhagem remanescente do fogo. Tal diminuição causa um maior contraste entre as áreas queimadas e as áreas não queimadas em imagens orbitais nessa faixa espectral. Segundo França e Ferreira (2005), para a região do infravermelho termal, entre os comprimentos de onda de 7 μ m e 15 μ m, as emissões tendem a aumentar após as queimadas, devido à elevação de temperatura do solo e a redução da umidade neste, bem como ao aumento da absorvância à radiação solar pela superfície e, conseqüentemente, da sua emissividade.

Na análise das emissões causadas pelas queimadas é habitual o uso das nomenclaturas energia radiativa do fogo (ERF) e potência radiativa do fogo (FRP). O conceito de energia radiativa do fogo permite a geração de dados 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. A potência radiativa do fogo é definida por Pereira et al. (2011) como a taxa na qual a energia eletromagnética é emitida pelo fogo.

O objetivo deste estudo é analisar a radiância espectral, a potência radiativa do fogo e sua energia radiativa provenientes da queima da palha da cana-de-açúcar a partir de um experimento de combustão em pequena escala. Com os resultados obtidos pretende-se estimar o coeficiente de biomassa consumida e adaptá-lo aos dados orbitais, a fim de que a partir do uso da energia radiativa do fogo extraídas das imagens de satélites seja possível determinar a biomassa consumida em áreas onde a colheita da cana-de-açúcar ocorre com a queima da palhada para o Estado de São Paulo.

2. Materiais e Métodos

2.1 Descrição do experimento

O experimento para medir a radiância espectral da queima da palha de cana-de-açúcar, a FRP e a ERF foi realizado no dia 02 de outubro de 2012 nas proximidades do Laboratório de radiometria do INPE durante o período noturno, de forma que as coleta da radiância espectral não sofresse interferência da radiação solar no sinal coletado. No início do experimento, às 19 h, a condição meteorológica era predominantemente de céu nublado com a temperatura do ar de 28° C e umidade relativa de 35%.

A Figura 1 mostra a estrutura do experimento. Para posicionar o equipamento destinado a medir a radiância, montou-se um andaime com aproximadamente 4 metros de altura (a). Nesta plataforma, posicionou-se o FieldSpec Pro FR (b) a uma distância de 2,8 metros das amostras de biomassa vegetal prontas para o processo de combustão (c).

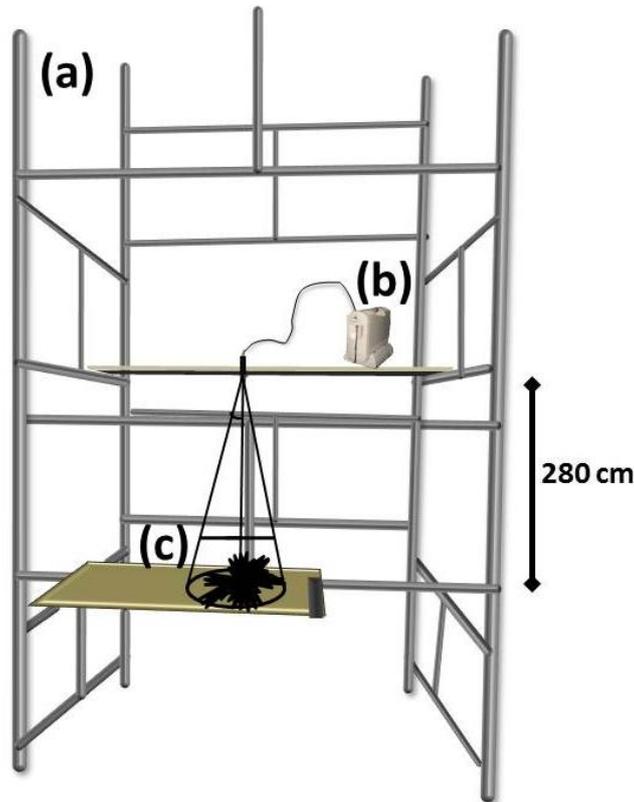


Figura 1. Estrutura montada para o experimento.

No total foram realizadas 9 amostragens de palha de cana-de-açúcar seca coletadas em uma área de cultivo de cana-de-açúcar, onde ocorria a colheita mecânica. Os pesos das amostras variaram entre 0,25 Kg e 1 Kg. Durante a queima de cada amostra foram realizadas as medidas de radiância do fogo em intervalo de 5 segundos. No experimento completo coletou-se 288 espectros de radiância.

2.2 Descrição do equipamento

O espectroradiômetro FieldSpec Pro FR, fabricado pela empresa norte-americana *Analytical Spectral Devices*, foi o instrumento utilizado para medir a radiância durante o experimento. O intervalo espectral medido pelo FieldSpec Pro FR é de 350nm a 2500nm, utilizando um IFOV de 25° e resolução espectral de 3nm a 10nm com tempo para aquisição de dados de aproximadamente 0,1 segundo por espectro. As medidas de radiância são feitas por dois diferentes tipos de detectores: um de fotodiodo no intervalo de 350nm a 1000nm e um conjunto de detectores entre 1000nm e 2500nm (Manual do FieldSpec, 2012).

2.3 Metodologia para a estimativa da Potência radiativa do Fogo e da Energia Radiativa de Fogo

Para o cálculo da FRP e da ERF a partir dos 288 espectros de radiância obtidos com o FieldSpec foi necessário primeiramente determinar a temperatura de brilho do fogo a partir da inversão da Lei de Planck. A Equação 1 apresenta a determinação da temperatura para um dado comprimento de onda e sua respectiva radiância.

$$T_{\lambda L} = \frac{C_2}{\lambda \cdot \ln \left[\left(\frac{C_1}{\lambda^5 \cdot L_\lambda} \right) + 1 \right]} \quad (1)$$

em que T (K) é a temperatura de brilho do fogo para um determinado comprimento de onda [λ (μm)] e sua radiância espectral L_λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), C_1 e C_2 são constantes ($1,19 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-4}$ e $1,44 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, respectivamente).

O comprimento de onda utilizado para o cálculo da temperatura foi $2,2 \mu\text{m}$, que corresponde a um comprimento de onda na faixa espectral do infravermelho médio. Esta escolha foi realizada por este comprimento de onda apresentar a maior energia liberada pela queima de biomassa.

O cálculo da potência radiativa do fogo para cada medição foi feito a partir da Equação 2.

$$FRP_{\text{medição}} = A \cdot \sigma \cdot T_{\text{medição}}^4 \quad (2)$$

em que FRP ($\text{MJ} \cdot \text{s}^{-1}$) representa a potência a radiativa do fogo para uma determinada medição, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), A (m^2) representa a área em que estava ocorrendo a queima da palhada para a amostra e T é a temperatura (K) para um determinada medição.

A integração da FRP para cada medição dá origem à ERF de cada amostra, a qual é representada pela Equação 3.

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

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 medição n, FRP_{n+1} ($\text{MJ} \cdot \text{s}^{-1}$) é a potência radiativa de fogo na medição n+1 e Δt é o intervalo de tempo entre as medições em segundos.

3. Resultados e Discussão

De acordo com a Lei do deslocamento de Wien, para as temperaturas da queimada (em torno de 800 K), a emissão máxima ocorreria nos comprimentos de onda próximos a $3,6 \mu\text{m}$, conforme apresentado na Figura 2, sendo esse o motivo que levou à escolha de um comprimento de onda na faixa espectral do infravermelho médio para os cálculos da FRP e da ERF. Cabe ressaltar que o FieldSpec Pro FR opera até o comprimento de onda de $2,5 \mu\text{m}$, porém a partir de $2,4 \mu\text{m}$ as medições apresentaram ruídos e, devido à esse motivo, foi utilizado o comprimento de onda $2,2 \mu\text{m}$.

O gráfico apresentado na Figura 3 mostra as medições da radiância espectral ao longo do tempo para uma amostra de 1 Kg de biomassa. Os maiores valores de radiância foram obtidos quando as chamas eram mais intensas e preenchiam a maior parte do IFOV do sensor, que ocorriam em tempos mais próximos do início de cada medição (geralmente em torno de 20 segundos). Cabe destacar que este tempo depende da quantidade de biomassa queimada. Após o consumo de grande parte da biomassa disponível, a radiância tende a diminuir no decorrer do tempo. Essa redução se deve à redução das chamas e início da fase de brasa, onde se tem menores temperaturas e consumo da biomassa (Pereira et al., 2012).

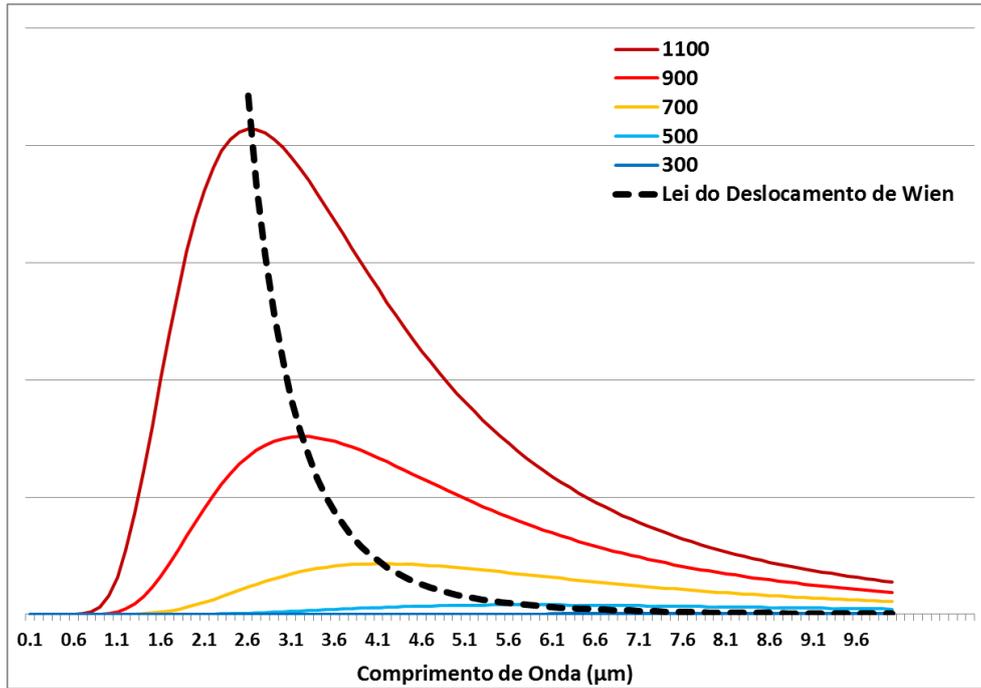


Figura 2. Curvas de radiação de corpo negro estimadas pela lei de Planck para várias temperaturas.

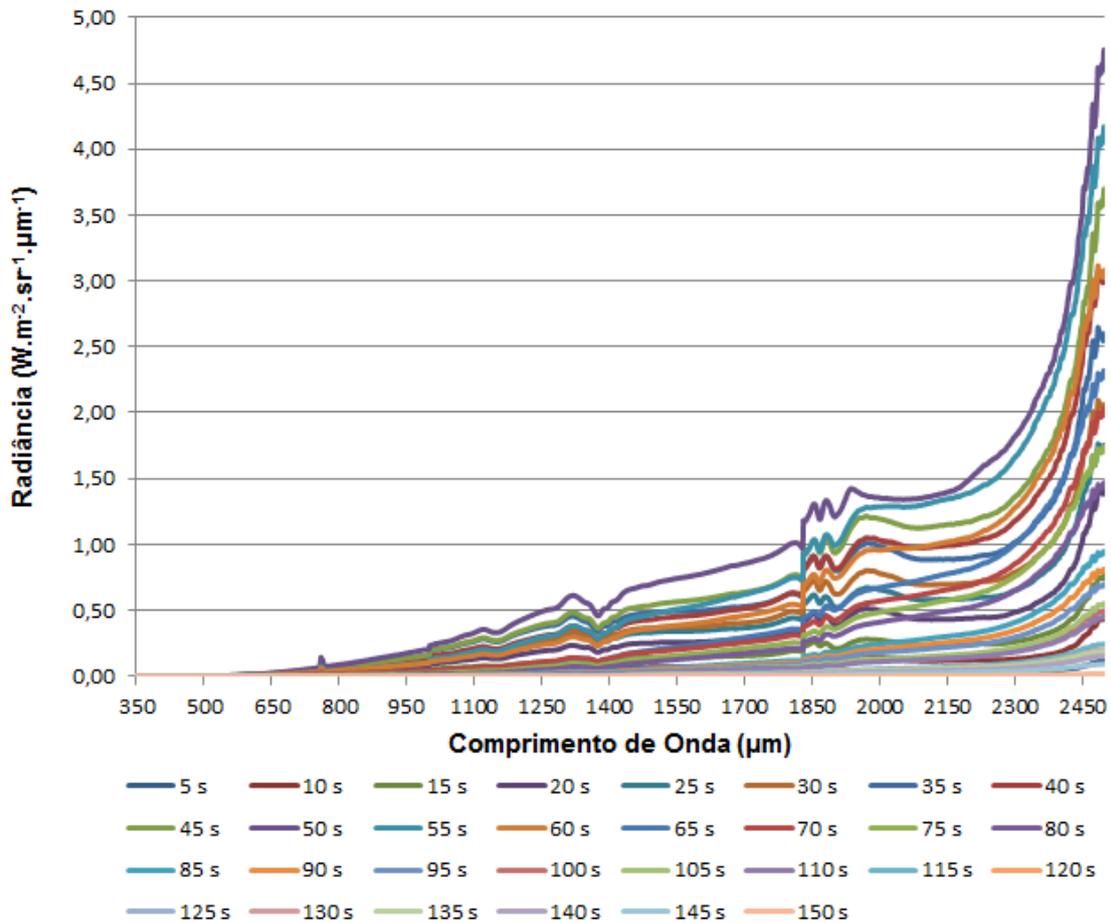


Figura 3. Radiação espectral emitida pela queima da palha de cana-de-açúcar para uma amostra de 1 Kg.

A Figura 4 mostra a FRP ao longo do tempo para uma amostra de 0,25 Kg de palha seca ao longo do tempo. Nos segundos iniciais do experimento a FRP é próxima de zero. Isso ocorre por ser o período entre o início da coleta de dados pelo FieldSpec e o início do espalhamento do fogo na amostra, que, quando ocorre, eleva a FRP rapidamente. Após um período de liberação de energia crescente, a FRP máxima emitida foi detectada em torno de 35 segundos, chegando a valores próximos de $0,054 \text{ MJ.s}^{-1}$. Em seguida a esse período de liberação máxima 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 obtidos em uma amostra no tempo e essa integração consiste na energia radiativa do fogo (ERF, em MJ).

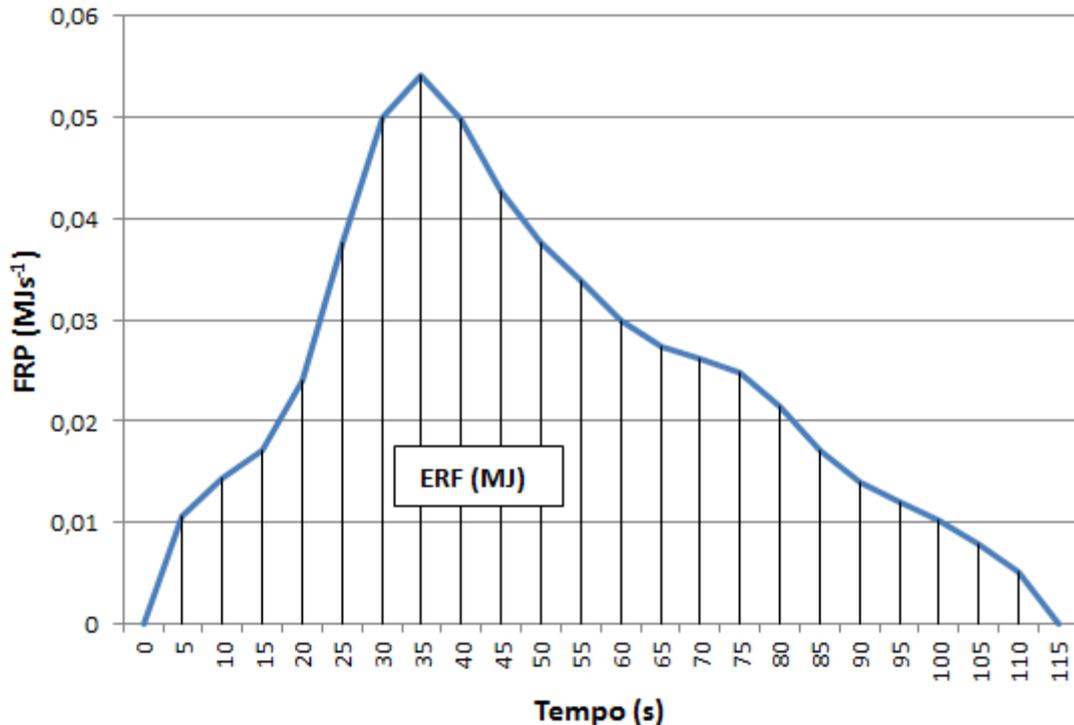


Figura 4. Potência radiativa do fogo (FRP) de uma amostra de 0,25 Kg ao longo do tempo.

Os valores encontrados de ERF para as nove amostras avaliadas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de ERF para as amostras do experimento

Biomassa (Kg)	ERF (MJ)
0,25	0,69
0,25	0,57
0,5	1,15
0,5	1,56
0,75	2,00
0,75	1,95
1	2,31
0,125	0,62
0,375	1,30

Como esperado, a ERF variou de acordo com a quantidade de biomassa consumida. Nota-se que as primeiras sete amostras apresentam um padrão, sendo que o maior valor encontrado refere-se à amostra de 1 Kg. As amostras de 0,125 Kg e 0,375 Kg apresentaram valores mais elevados do que as amostras com quantidade de biomassa próximas, o que pode ser resultado de influências nas condições atmosféricas, uma vez que essas duas amostras foram as últimas realizadas no experimento. Durante as medições destas duas últimas amostras a velocidade do vento aumentou e acelerou o processo de espalhamento do fogo, portanto isto pode ter ocasionado a elevação dos valores de ERF.

Estes resultados auxiliam na estimativa do coeficiente multiplicativo de biomassa consumida a partir do uso da energia radiativa do fogo e são passíveis de serem adaptados aos dados orbitais a fim de permitir a estimativa da biomassa consumida em queimadas nas áreas de cana-de-açúcar por imagens de satélites.

5. Conclusões

Independente do espectroradiômetro FieldSpec Pro FR não operar no intervalo espectral de maior emissão das queimadas, este instrumento detecta parte da energia emitida pela queima de biomassa. Verificou-se que os valores encontrados para radiância, FRP e ERF provenientes da queima da palha da cana-de-açúcar apresentaram o comportamento equivalente ao descrito na literatura, uma vez que o comprimento de onda de 2,2 μm utilizado permitiu representar a função de Planck.

A metodologia abordada para estimar a FRP e a ERF utilizando um intervalo fixo de tempo entre cada medição mostrou-se eficiente, uma vez que a partir de sua adoção foi possível estabelecer uma relação entre a potência radiativa do fogo ao longo do tempo. Isto possibilitou a obtenção de estimativas mais precisas da energia radiativa do fogo. Ao comparar estes resultados com aqueles gerados em experimentos similares já realizados, verificou-se que o uso de um intervalo de tempo maior entre as medições provoca a obtenção de valores inconsistentes de ERF.

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 01 nov. 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 04 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: 29 de out. de 2012.

França, H. Identificação e mapeamento de cicatrizes de queimadas com imagens AVHRR/NOAA. In: Ferreira, N. J. (coord.). **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. p. 57-78.

França, D. A.; Ferreira, N. J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos

Campos: INPE, 2005. p. 3017-3023. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.20.11.30/doc/3017.pdf>>. Acesso em 08 nov. 2012.

Liu, R.; Liang, S.; He, H.; Liu, J.; Zheng, T. Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 998-1009, 2008.

Loarie, S.R., Lobell, D.B., Asner, G.P., Mu, Q.; Field, C.B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v.1, n.02, p.105-109, 2011.

Manual do Fieldspec. **FieldSpec® Operating and Post-processing Software**. Disponível em: <www.asdi.com>. Acesso em: 23 out. 2012.

Pereira, G.; Moraes, E. C.; Arai, E.; Oliveira, L. G. L. Estudo preliminar da estimativa da reflectância e albedo de microssistemas pantaneiros a partir de imagens de satélite. In: Simpósio de Geotecnologias do Pantanal, 1., 2006, Campo Grande. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2006. p. 901-911. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm17%4080/2006/12.08.13.50/doc/p122.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 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.

Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D. A.; Silva, W. F.; Sugawara, L. M.; Adami, M.; Moreira, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, p.1057-1076, 2010.

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.