

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

## ANÁLISE DO EFEITO DE *BACKGROUND* NA ESTIMATIVA DA POTÊNCIA E DA ENERGIA RADIATIVA DO FOGO

GUILHERME AUGUSTO VEROLA MATAVELI<sup>1</sup>, GABRIEL PEREIRA<sup>2</sup>, ELISABETE CARIA MORAES<sup>1</sup>, BRUNO SILVA OLIVEIRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010, Brasil  
[mataveli@dsr.inpe.br](mailto:mataveli@dsr.inpe.br), [bete@dsr.inpe.br](mailto:bete@dsr.inpe.br), [bruno.so@dsr.inpe.br](mailto:bruno.so@dsr.inpe.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei, Minas Gerais, CEP: 36307-352, Brasil  
[pereira@ufsj.edu.br](mailto:pereira@ufsj.edu.br)

### RESUMO

Atualmente, o sensoriamento remoto orbital é a principal fonte de dados para o estudo das queimadas e para estimar a quantidade de biomassa queimada. Dentre os métodos para estimar a biomassa queimada, o método mais efetivo é derivado da Potência Radiativa do Fogo (FRP) e da Energia Radiativa do Fogo (FRE), sobre a premissa de que a energia emitida como radiação eletromagnética durante a combustão é diretamente relacionada com a biomassa queimada. Contudo, devem ser compreendidos os fatores que introduzem erros na FRP e na FRE, como o *background*, e que prejudicam a acurácia da estimativa da biomassa queimada a partir da FRP e da FRE. O presente trabalho avalia a influência do *background* na estimativa da FRP e da FRE a partir de um experimento de combustão em pequena escala, sendo que os resultados encontrados mostram que o mesmo aumentou em média 13% as estimativas obtidas.

Palavras-Chave: Queimadas; Queima de Biomassa; Sensoriamento Remoto; Experimento de Combustão em Pequena Escala.

### ANALYSIS OF THE BACKGROUND EFFECT IN FIRE RADIATIVE POWER AND ENERGY ESTIMATE ABSTRACT

Nowadays, orbital remote sensing is the main source of data to study fires and to estimate the amount of biomass burning. Among the methods used to estimate biomass burning, the most effective derives from Fire Radiative Power (FRP) and Fire Radiative Energy (FRE), based on the principle that the energy emitted as electromagnetic radiation during the combustion process is directly related to the amount of biomass burning. However, a few factors can that introduce errors

Recibido: 18/11/2015

Aceptada versión definitiva: 17/07/2017

Editor al cargo: Dr. Martin Garbulsky

**Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)**

© Los autores

[www.geo-focus.org](http://www.geo-focus.org)

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

in FRP and FRE, such as the background, which have impact over the accuracy of biomass burning estimates using FRP and FRE. In this context, the present study evaluates the influence of the background in FRP and FRE estimation from a small-scale combustion experiment. Thus, results found in the experiment showed that the background increased on average the estimates found in 13 %.

Keywords: Fires; Biomass Burning; Remote Sensing; Small-scale Combustion Experiment.

## 1. Introdução

As queimadas são um fenômeno que ocorre na maioria das partes vegetadas da superfície terrestre, seja através de queimadas naturais ou de origem antrópica (VAN DER WERF *et al.*, 2006; ICHOKU *et al.*, 2012; HANTSON *et al.*, 2013) e contribuem ativamente para o acúmulo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases do efeito estufa na atmosfera, afetando, desta forma, a qualidade do ar local e regional (KAISER *et al.*, 2012). Sendo assim, elas possuem um importante papel no sistema terrestre por emitirem gases traços e aerossóis para a atmosfera, por atuarem como um agente modelador dos ecossistemas, ou por serem uma fonte introdutória de mudanças no uso e cobertura da terra (ECKMAN *et al.*, 2008; ICHOKU *et al.*, 2008; SHIMABUKURO *et al.*, 2013). Além disso, sua ocorrência excessiva pode causar a perda da biodiversidade, empobrecimento do solo e custos econômicos e sociais. (FEARNSIDE, 2000; VERAVERBEKE *et al.*, 2014)

Ao analisar os ecossistemas terrestres, as savanas tropicais concentram a maioria das queimadas (BOWMAN *et al.*, 2009). Na região tropical, apesar da ocorrência natural ser comum (RAMOS NETO & PIVELLO, 2000), a atividade humana é a principal causa das queimadas, pois o fogo é uma ferramenta importante para a abertura de novas áreas destinadas às atividades agropecuárias, para a limpeza de resíduos e rotação de culturas agrícolas, para o controle de pragas, e para a manutenção de pastagens (LAUK & ERB, 2009; ARCHIBALD *et al.*, 2011; SHIMABUKURO *et al.*, 2013). No Brasil, as queimadas ocorrem principalmente no bioma Cerrado, onde localizaram-se 73 % da área queimada no Brasil entre 2002 e 2010 (DE ARAÚJO *et al.*, 2012), relacionada principalmente à expansão agropecuária (BEUHLÉ *et al.*, 2015), e no arco do desmatamento (Bioma Amazônia), que concentrou a maioria dos focos de queimada no Brasil no período 2002-2010 (DE ARAÚJO *et al.*, 2012). Geralmente, as queimadas ocorrem na estação seca (entre julho e outubro), com maior incidência ao final desta estação, quando a vegetação está mais vulnerável ao fogo, devido a fatores como baixa umidade e ausência de chuvas (COUTINHO, 1990). Além destas áreas, a queima da palhada da cana-de-açúcar para a colheita na Região Centro-Sul contribui ativamente para a queima de biomassa em escala nacional (FRANÇA *et al.*, 2012). Com a rápida expansão do cultivo da cana-de-açúcar na Região Centro-Sul na última década, especialmente depois do ano de 2003, a prática da queimada pré-colheita vem sendo combatida devido aos seus impactos negativos sobre a saúde e o meio ambiente ocasionados, principalmente, pela emissão de gases poluentes e aerossóis (AGUIAR *et al.*, 2011).

A queima de biomassa compreende a combustão de todos os tipos de material orgânico, em particular as plantas, e inclui a queima de biomassa na natureza ou para fins agropecuários, assim

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

como o uso de lenha para cozinhar ou fazer carvão (ICHOKU *et al.*, 2012), sendo sua estimativa utilizada para quantificar as emissões de gases traços e aerossóis e como dado de entrada em modelos ambientais e climatológicos (XU *et al.*, 2010). Estima-se que anualmente entre 3567 e 3938 teragramas (Tg) de matéria seca são consumidas somente pelas queimadas antrópicas, sendo que dois terços deste total ocorrem na região tropical (GIGLIO *et al.*, 2006; LAUK & ERB, 2009). Os estudos relacionados às estimativas de biomassa queimada foram realizados durante muitas décadas a partir de experimentos e medições *in situ*, porém a cobertura espacial e temporal desse tipo de abordagem é limitada (ANDREAE & MERLET, 2001). A partir da década de 1990, com os avanços no sensoriamento remoto orbital, as dificuldades impostas por essas limitações diminuíram, possibilitando a aquisição de informações em nível global de forma sistemática (ICHOKU *et al.*, 2012; SHVETSOV & PONOMAREV, 2015; ANDREALA *et al.*, 2016) e tornaram os dados provenientes de sensores orbitais a principal fonte de dados para estimar a quantidade de biomassa queimada e as emissões provenientes da queima de biomassa (FREITAS *et al.*, 2007; ICHOKU *et al.*, 2008; HANTSON *et al.*, 2013; HUANG *et al.*, 2015; SHI *et al.*, 2015; PEREIRA *et al.*, 2016).

Vários métodos foram desenvolvidos ao longo do tempo para estimar a biomassa queimada a partir do sensoriamento remoto orbital (FREEBORN *et al.*, 2008). Tradicionalmente, a quantidade de biomassa queimada é estimada a partir da Equação 1 (SEILER & CRUTZEN, 1980):

$$BB = B_a * B_d * \alpha \quad (1)$$

em que BB é a quantidade de biomassa queimada (kg),  $B_a$  é a área queimada ( $\text{km}^2$ ),  $B_d$  representa a biomassa disponível para queima ( $\text{kg km}^{-2}$ ) e  $\alpha$  é o fator de combustão.

No entanto, existem incertezas que podem prejudicar a acurácia da estimativa da biomassa queimada a partir da Equação 1. Essas incertezas residem no fato de  $\alpha$  ser específico para cada espécie vegetal, além da impossibilidade de obter  $\alpha$  a partir de estimativas derivadas de sensores orbitais e na baixa acurácia das estimativas de  $B_a$  e  $B_d$  (VAN DER WERF *et al.*, 2006; CARDOZO *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.*, 2012; DE ARAÚJO & FERREIRA, 2015), o que gerou o interesse em métodos alternativos para estimar a biomassa queimada (ANDREAE & MERLET, 2001).

Atualmente, o método mais utilizado para estimar a biomassa queimada é derivado da Potência Radiativa do Fogo (FRP) (ROBERTS *et al.*, 2005; WOOSTER *et al.*, 2005; FREEBORN *et al.*, 2008; VERMOTE *et al.*, 2009; SCHROEDER *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2012; GIGLIO *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2016), que é definida como a taxa na qual a energia é emitida pelo fogo como radiação eletromagnética (WOOSTER *et al.*, 2003). Esse método é baseado no trabalho de Wooster (2002), que testou as relações entre a FRP e a biomassa queimada a partir de um experimento de combustão em pequena escala e chegou à conclusão que existe de uma relação linear entre as variáveis, sendo que esse método apresenta estimativas de biomassa queimada e emissões com maior acurácia do que estimativas obtidas por métodos baseados na área queimada (ROBERTS *et al.*, 2005; CARDOZO *et al.*, 2015). Atualmente, a FRP está disponível de forma gratuita em produtos de fogo ativo derivados de sensores a bordo de satélites em órbita polar, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e de sensores a bordo de satélites em órbita geoestacionária, como o *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) e o *Geostationary Operational Environmental Satellite Imager* (GOES Imager). Contudo, como toda

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

estimativa obtida por sensoriamento remoto orbital, deve-se atentar aos fatores que introduzem erros na estimativa da FRP (ICHOKU *et al.*, 2012; FREEBORN *et al.*, 2014). Cabe aqui ressaltar que o uso da FRP permite estimar a taxa em que a biomassa queimada, já que a mesma é uma estimativa instantânea (ICHOKU *et al.*, 2012). A estimativa do total de biomassa queimada é realizada a partir da Energia Radiativa do Fogo (FRE), que é definida como a energia emitida pelo fogo como radiação eletromagnética durante o ciclo de vida da queimada e pode ser obtida a partir da integração temporal da FRP (WOOSTER *et al.*, 2003).

Apesar de os estudos voltados para estimar a quantidade de biomassa queimada através de sensoriamento remoto orbital terem crescido, ainda existem incertezas tanto nos dados de entrada quanto na aplicação das metodologias utilizadas que podem gerar um erro de até 50 % nos valores estimados (VERMOTE *et al.*, 2009). Dentre esses fatores, pode-se citar o ângulo de visada, que pode aumentar a FRP em até 22 % para ângulos superiores a 40° (PAUGAM *et al.*, 2013; FREEBORN *et al.*, 2014; MATAVELI *et al.*, 2015), o modo de propagação do fogo e a fase de combustão, sendo que os valores estimados na frente de fogo podem ser até o dobro das estimativas obtidas na posição contrária à frente do fogo (PAUGAM *et al.*, 2013; SURAWSKI *et al.*, 2015), e a umidade do material exposto ao processo de combustão, que pode impactar em até 11 % na biomassa queimada estimada a partir da FRP (RIGGAN *et al.*, 2004; SMITH *et al.*, 2013). Ainda, cabe destacar a influência da área de fogo ativo, já que para se estimar a FRP é preciso determinar a área em que a queimada está efetivamente ocorrendo (ICHOKU *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.* (2012). A dificuldade em determinar a área de fogo ativo com o uso de sensores remotos orbitais reside no fato de a radiância correspondente a um *pixel* compreender a radiância média de todos os objetos contidos no *pixel*, sendo que cada um desses objetos possui sua própria temperatura e emissividade ao invés do *pixel* ser puro e conter somente um objeto com uma única temperatura (ECKMAN *et al.*, 2008). Portanto, num determinado *pixel* a estimativa da temperatura nem sempre é representativa da temperatura do fogo, mas sim uma combinação das temperaturas dos componentes que estão queimando e dos componentes que não estão queimando, ou seja, o *background*. Apesar disso, não existem estimativas precisas da influência do *background* na estimativa da FRP.

Uma maneira eficaz de determinar a influência desses fatores na estimativa da FRP e da FRE é a realização de experimentos de combustão em pequena escala com a queima controlada de quantidades pré-determinadas de biomassa (WOOSTER, 2002; FREEBORN *et al.*, 2008; SMITH *et al.*, 2013; MATAVELI *et al.*, 2015), já que a aplicação de tais experimentos permite um maior controle sobre condições de espalhamento do fogo e sobre as variáveis externas, como o vento, que podem impactar sobre a FRP (ICHOKU *et al.*, 2012). Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo determinar o efeito do *background* na estimativa da FRP e da FRE a partir de um experimento de combustão em pequena escala.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

## 2. Potência Radiativa do Fogo e métodos para sua estimativa

A FRP pode ser estimada ao se conhecer a distribuição da temperatura no interior do *pixel*, como demonstrado na Equação 2 (KAUFMAN *et al.*, 1996):

$$FRP = \varepsilon * \sigma * \sum_{i=1}^n A_n * T_n^4 \quad (2)$$

em que FRP representa a potência radiativa do fogo (MW),  $\varepsilon$  é a emissividade,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $A_n$  representa a área fracional da enésima componente termal ( $\text{m}^2$ ) e  $T_n$  é a temperatura da enésima componente (K).

No entanto, considerando as características dos sensores orbitais não é possível o uso da Equação 2 diretamente, pois é necessário determinar a área das  $n$  componentes com anomalia térmica e a temperatura da componente fogo em cada *pixel* (que pode chegar a 8 km, para o produto de fogo derivado do SEVIRI) e dificilmente a queimada ocorre em toda área de um *pixel* imageado por um sensor orbital (ECKMAN *et al.*, 2010; WOOSTER *et al.*, 2011). Geralmente, dois tipos de métodos são utilizados para determinar a temperatura e a área de fogo em nível de *subpixel*: o método bi-espectral, que explora a diferença do sinal emitido pelo fogo em dois ou mais canais espectrais co-registrados, como o método de Dozier (1981), ou os métodos que usam o sinal emitido pelo fogo em uma banda no canal espectral do infravermelho médio (IVM), como o método proposto por Wooster *et al.* (2003). Cabe aqui ressaltar que existem outros métodos para determinar a temperatura e a área de fogo em nível de *subpixel*, como o método proposto por Peterson *et al.* (2013), no entanto, serão descritos a seguir apenas os métodos utilizados nos principais produtos de fogo ativo existentes atualmente.

Um dos métodos mais empregados para caracterizar a temperatura e a área de fogo ativo no *subpixel* foi introduzido por Dozier (1981). Este método, desenvolvido inicialmente para o sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), mas que pode ser utilizado para qualquer sensor, explora a diferença existente na resposta dos canais centrados em 4 micrometros ( $\mu\text{m}$ ) e 11  $\mu\text{m}$  para as altas temperaturas dos elementos que compõe o *pixel*. Dessa forma, o *pixel* é separado em duas componentes: a componente fogo e a componente *background*, sendo as Equações 3 e 4 resolvidas em função da temperatura e da área do *subpixel*.

$$L_{4\mu\text{m}} = A_f * B(\lambda_{4\mu\text{m}}, T_f) + (1 - A_f) * B(\lambda_{4\mu\text{m}}, T_b) \quad (3)$$

$$L_{11\mu\text{m}} = A_f * B(\lambda_{11\mu\text{m}}, T_f) + (1 - A_f) * B(\lambda_{11\mu\text{m}}, T_b) \quad (4)$$

em que  $L$  representa a radiância espectral ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) nos canais centrados em 4  $\mu\text{m}$  e 11  $\mu\text{m}$ ,  $B(\lambda, T)$  é a função de Planck,  $A_f$  é a área do fogo ( $\text{m}^2$ ),  $\lambda$  é o comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ ) e  $T_f$  e  $T_b$  representam, respectivamente, a temperatura do fogo e do *background* (K).

De acordo com Eckman *et al.* (2008), a aplicação do método de Dozier exige algumas suposições: a componente fogo tenha uma única temperatura; a componente *background* se comporte como um corpo negro e que a interferência da atmosfera seja mínima. Além disso, erros introduzidos no processo de aquisição dos dados como ruídos eletrônicos, erros de registro entre

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

bandas de diferentes resoluções espaciais, saturação e função de espalhamento pontual podem ocasionar variações superiores a 100 % nos valores estimados (GIGLIO *et al.*, 2003).

Considerando as limitações na estimativa da FRP a partir da Equação 2 e o método bi-espectral de Dozier (1981), Kaufman *et al.* (1996) desenvolveram um método que utiliza apenas uma banda espectral e a temperatura de brilho do *pixel* que contém a queimada. Nesse método, elaborado para a banda 21 do MODIS, a FRP é estimada a partir da Equação 5:

$$FRP = 4,3 * 10^{-19} * (T_{f4\mu m}^8 - T_{b4\mu m}^8) * A_{real} \quad (5)$$

em que FRP é a potência radiativa do fogo (MW ou MJ s<sup>-1</sup>),  $T_f$  é a temperatura de brilho do *pixel* com anomalia térmica em 4µm (K),  $T_b$  é a temperatura do *background* em 4µm (K) e  $A_{real}$  é a área real do *pixel* (km<sup>2</sup>).

Como esse método considera somente uma banda espectral, algumas limitações impostas pelos métodos bi-espectrais são superadas, como a ausência de erros de registro entre bandas de diferentes resoluções espaciais. Outro método que permite estimar a FRP a partir de apenas uma banda espectral foi proposto por Wooster *et al.* (2003). Nesse método, utilizado no produto de fogo ativo derivado do SEVIRI, a FRP é estimada empregando a radiância espectral na região do IVM, como apresentado na Equação 6:

$$FRP = \frac{A_{pixel}}{a} * \sigma * \epsilon * \int_{\lambda_f}^{\lambda_i} B(\lambda, T) d\lambda - L_b \quad (6)$$

em que  $A_{pixel}$  é o tamanho do *pixel* (km<sup>2</sup>),  $a$  é uma constante de calibração baseada na resposta espectral de cada sensor (W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> µm<sup>-1</sup> K<sup>-4</sup>) extraída de Wooster *et al.* (2005),  $L_b$  é a radiância espectral do *background*, e  $\lambda_i$  e  $\lambda_f$  são o comprimento de onda inicial e final correspondentes a largura de banda do sensor (µm).

### 3. Materiais e métodos

#### 3.1. Câmera termal

A câmera termal utilizada no experimento de combustão em pequena escala é fabricada pela empresa *FLIR Systems Incorporation*. O modelo A310 possui um *frame* de 320x240 *pixels*, chegando à máxima temperatura captada de 1200° Celsius (°C), sendo a faixa do espectro eletromagnético em que o instrumento opera correspondente à região espectral do infravermelho termal, nos comprimentos de onda entre 7,5µm e 13µm (FLIR, 2016). A FLIR A310 opera em 3 faixas de temperatura, entre -20°C e 120°C, entre 0°C e 350°C e entre 200°C e 1200°C, sendo que para cada faixa de temperatura existe uma calibração específica (FLIR, 2016). Como a temperatura de uma queimada pode chegar a atingir mais de 900° C, a faixa de temperatura mais adequada para o experimento de combustão em pequena escala é a de 200°C a 1200°C. Porém, nessa faixa de temperatura as temperaturas menores que 80°C não são discretizadas, devido à calibração e otimização do instrumento (FLIR, 2016).

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

### 3.2. Descrição do experimento de combustão em pequena escala

O experimento para analisar os erros introduzidos pelo *background* na estimativa da FRP e da FRE a partir da queima de quantidades controladas de biomassa ocorreu durante dois dias no Campus Tancredo Neves da Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ). Anteriormente ao experimento, foi definido como tipo de biomassa a ser submetida ao processo de combustão a palha da cana-de-açúcar (devido à disponibilidade em coletar o material) e realizadas duas coletas da palhada na CanaVialis, unidade da empresa Monsanto especializada em cana-de-açúcar. A palha de cana-de-açúcar coletada (Figura 1(a)) foi exposta ao sol durante um período de 14 dias a fim de secar o material e diminuir os erros introduzidos pela umidade do material exposto à combustão na FRP (SMITH *et al.*, 2013), e posteriormente separada e pesada (Figura 1(b)) de acordo com os pesos apresentados na tabela 1. Cabe ressaltar que os pesos presentes na tabela 1 foram definidos pelos autores a partir da quantidade de biomassa disponível para a realização do experimento. No total, foram utilizadas 16 amostras que contabilizaram 2 kg de biomassa. Durante o experimento, a câmera termal (Figura 1(c)) foi posicionada sempre no nadir em relação às amostras de biomassa submetidas ao processo de combustão (Figura 1(d)), a fim de evitar os erros introduzidos pelo ângulo de visada na estimativa da FRP (PAUGAM *et al.*, 2013; FREEBORN *et al.*, 2014; MATAVELI *et al.*, 2015). Para calibração da câmera termal, foram adotadas como condições iniciais a faixa de temperatura de 200°C a 1200°C, temperatura atmosférica 19°C e umidade do ar 79 %, sendo a temperatura atmosférica e a umidade do ar obtidas no início do experimento a partir de uma estação climatológica portátil. Os dados foram adquiridos pela câmera termal com o uso de uma lente com IFOV de 15° a uma frequência de 5 Hertz (Hz).



Figura 1. Etapas realizadas para a execução do experimento de combustão em pequena escala.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

**Tabela 1. Peso de cada amostra, número de amostras e total de amostras e pesos utilizados no experimento de combustão em pequena escala.**

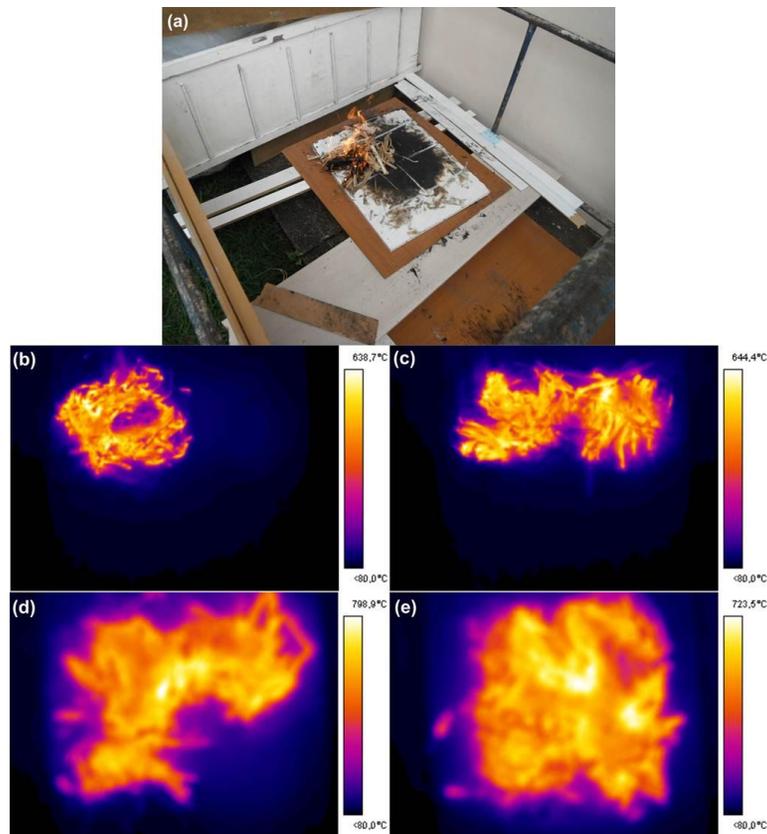
Peso da Amostra (g)	Número de Amostras	Peso total (kg)
50	4	0,2
100	4	0,4
150	4	0,6
200	4	0,8
Total	16	2

Durante o experimento, o início do processo de combustão sempre se iniciou com as chamas em direção à câmera termal, para simular a frente de fogo e evitar os erros na estimativa da FRP causados pelo modo de propagação do fogo e a fase de combustão (PAUGAM *et al.*, 2013; SURAWSKI *et al.*, 2015). Ainda, evitou-se sempre a influência de alterações das variáveis velocidade do vento (MATAVELI *et al.*, 2015) e contaminação por altas temperaturas nas estimativas. Para o vento, foi utilizada uma estação meteorológica portátil para medir a velocidade do vento no momento da queima de cada amostra e, caso a velocidade do vento fosse maior que zero km/h, a amostra seria descartada. Em relação à contaminação das amostras pelas altas temperaturas das plataformas que as amparavam, optou-se por fazer um revezamento entre quatro plataformas diferentes para expor as amostras à combustão, assim, enquanto uma plataforma era utilizada (Figura 1(d)) as outras três ficavam à espera esfriando, e só eram utilizadas novamente quando sua temperatura estava abaixo da temperatura mínima discretizada pela câmera termal para a faixa de temperatura considerada no experimento (80°C).

### 3.3. Metodologia para o processamento da FRP e processamento dos dados

Os dados gerados pela câmera termal durante o experimento de combustão em pequena escala foram processados no *software* MATLAB, tendo como variáveis de saída após o processamento a FRP, FRE, a área queimada e o tempo de combustão para cada uma das amostras. Para analisar a influência do *background* na estimativa da FRP definiu-se uma área de interesse (correspondente à 0,8 m<sup>2</sup>) e a mesma foi dividida em 4 quadrantes (Figura 2(a)). Foram queimadas 4 amostras de 50g de palha de cana-de-açúcar preenchendo completamente um quadrante (Figura 2(b)), 4 amostras de 100g preenchendo completamente 2 quadrantes (Figura 2(c)), 4 amostras de 150g preenchendo completamente 3 quadrantes (Figura 2(d)) e 4 amostras de 200g preenchendo completamente 4 quadrantes (Figura 2(e)).

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>



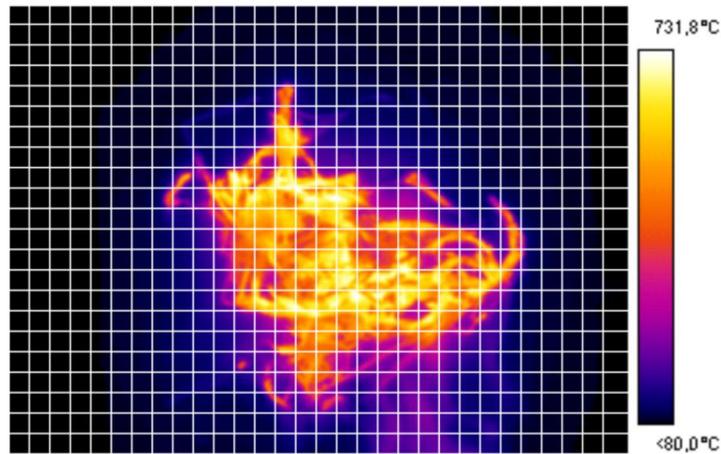
**Figura 2. Exemplo de uma amostra preenchendo, respectivamente, 1, 2, 3 e 4 quadrantes da área de interesse**

A FRP de cada um dos *pixels* ( $FRP_{\text{pixel}}$ ) pertencentes a cada uma das imagens (*frames*) (Figura 3) foi estimada a partir da Equação 2 considerando a emissividade igual a 1, já que com o uso da câmera termal é possível determinar diretamente a temperatura do fogo e a área de fogo ativo, e para a estimativa da FRP total de cada *frame* ( $FRP_{\text{frame}}$ ) utilizou-se a Equação 7:

$$FRP_{\text{frame}} = \sum FRP_{\text{pixel}} \quad (7)$$

em que  $FRP_{\text{frame}}$  representa a potência radiativa do fogo de cada *frame* (MW) e  $FRP_{\text{pixel}}$  é a potência radiativa do fogo para cada *pixel* que contém queimada (MW).

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>



**Figura 3.** *Frame* gerado pela câmera termal sobreposto pela representação dos *pixels* contidos no *frame*.

Para a estimativa da FRP sem *background* considerou-se todos os *pixels* com temperatura menor que  $80^{\circ}\text{C}$  como *background* ( $\text{FRP}_{\text{pixel}} < 0,0057\text{ W}$ ), e, portanto, os mesmos foram excluídos da estimativa da  $\text{FRP}_{\text{pixel}}$ . A temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$  foi determinada pelas características da câmera termal, uma vez que o equipamento não discretiza temperaturas menores que  $80^{\circ}\text{C}$  na faixa de temperatura utilizada, como descrito anteriormente. Em seguida, para a estimativa da FRP com *background*, foi atribuída a temperatura da palha da cana-de-açúcar antes da combustão para todos os *pixels* pertencentes à área analisada e que apresentavam temperatura menor que  $80^{\circ}\text{C}$ , e, desta forma, os mesmos foram contabilizados na estimativa da  $\text{FRP}_{\text{pixel}}$ . A medida da temperatura da palha da cana-de-açúcar foi realizada antes do início da combustão com a câmera de termal na faixa de temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $350^{\circ}\text{C}$ , sendo o valor encontrado de  $20^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 4 exemplifica a estimativa da FRP a partir da Equação 2 com e sem o *background* em um caso hipotético. No exemplo, foi simulada a FRP para 3 tempos, sendo considerada a área de cada *pixel*  $1\text{ m}^2$ , a  $\epsilon$  igual a 1, os valores da temperatura em K apresentados em vermelho e a  $\text{FRP}_{\text{pixel}}$  apresentada em azul dentro de cada *pixel*. No tempo 1, a  $\text{FRP}_{\text{Frame}}$  com *background* é maior do que  $0\text{ W}$ , já que a temperatura da palha da cana-de-açúcar ( $293\text{ K}$ ) foi atribuída aos *pixels* considerados com *background* ( $< 353\text{ K}$ ). Já no tempo 2, com o início da combustão, que eleva a temperatura de um *pixel* a  $600\text{ K}$ , a diferença entre a  $\text{FRP}_{\text{Frame}}$  com e sem *background* chega a mais de  $1200\text{ W}$ . Para o tempo 3, com o espalhamento do fogo sobre a amostra e nenhum *pixel* considerado como *background*, a  $\text{FRP}_{\text{Frame}}$  com o *background* seria a mesma que  $\text{FRP}_{\text{Frame}}$  sem o *background*.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

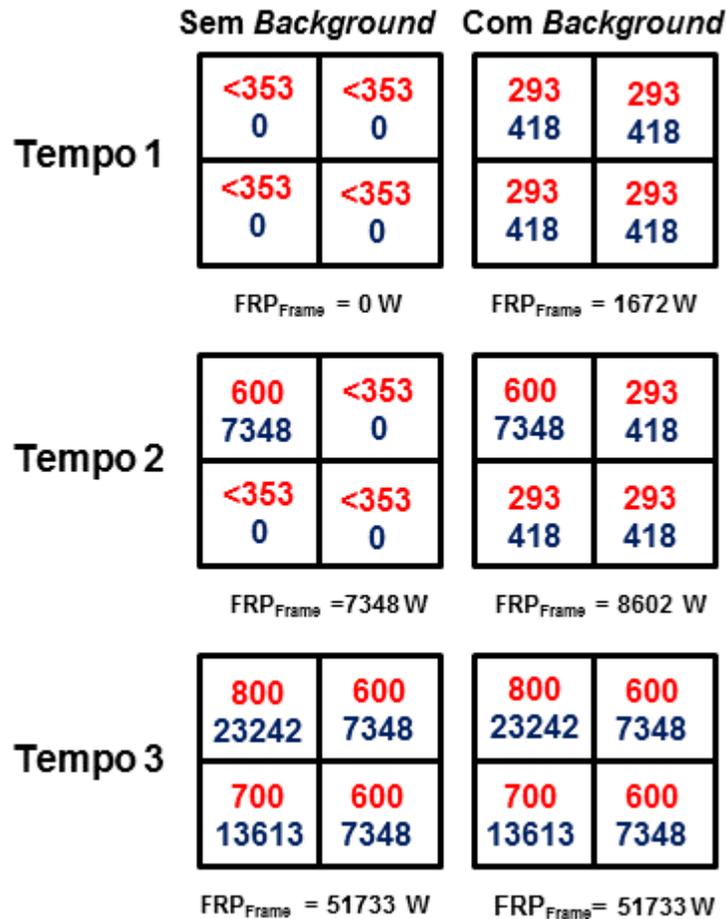


Figura 4. Exemplo da FRP estimada para uma mesma amostra com e sem o *background*.

Com base nas estimativas da FRP<sub>frame</sub> e seus respectivos horários de ocorrência, a FRE de cada amostra foi estimada pela Equação 8:

$$FRE = \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n (FRP_{Frame\_n} + FRP_{Frame\_n+1}) \cdot \Delta t \quad (8)$$

onde FRE representa energia radiativa de fogo (MJ) para cada amostra, FRP<sub>Frame\_n</sub> (MW) é a potência radiativa de fogo no *frame* n e FRP<sub>Frame\_n+1</sub> (MW) é a potência radiativa de fogo no próximo *frame*, enquanto  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (s) entre as estimativas.

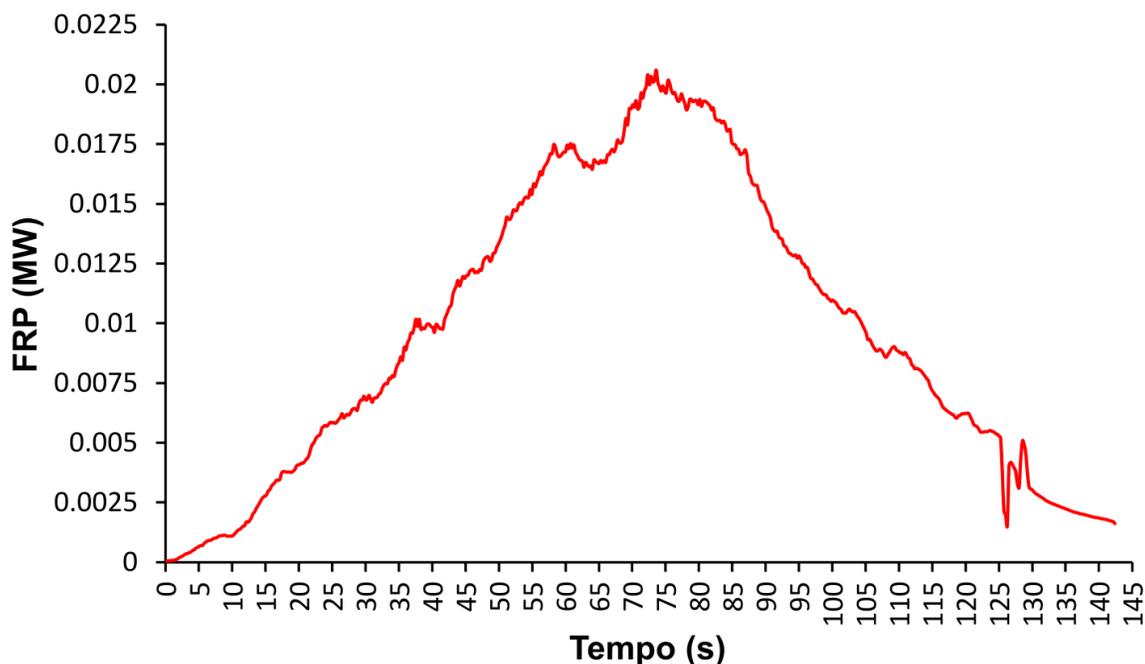
A análise estatística da diferença entre a FRE com e sem o *background* foi realizada a partir do teste t-Student pareado para médias, sendo adotada a hipótese inicial que a média da FRE estimada para as duas situações é igual. Por fim, o cálculo da área queimada de cada *frame* gerado pela câmera termal consistiu no somatório da área de todos os *pixels* com temperatura superior a 80°

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

C e o tempo de combustão foi determinado a partir do momento em que a FRP apresentou valor maior que zero, ou seja, o tempo inicial foi definido como o instante em que a  $FRP_{Frame}$  foi pela primeira vez superior a 0 W em cada amostra.

#### 4. Resultados e Discussão

A Figura 5 apresenta a FRP para uma amostra de 150 gramas ao longo do processo de combustão, que é representativa do comportamento da FRP para as demais amostras. Nos primeiros segundos, a FRP é próxima de zero, uma vez que o processo de combustão se inicia com o espalhamento do fogo na amostra, que, quando ocorre, eleva a FRP rapidamente. Após um período de liberação crescente a FRP máxima emitida para foi detectada em torno de 80 segundos, chegando a valores próximos de 0,02 MW. Apesar do comportamento semelhante, deve-se destacar que a FRP máxima emitida aumenta de acordo com a quantidade de biomassa disponível para a queima (MATAVELI *et al.*, 2015), como demonstrado por Wooster *et al.* (2005), que encontraram FRP máxima emitida em torno de 24 MW para uma amostra de 1,25 kg em um experimento de combustão de pequena escala realizado com espécies vegetais da savana africana.



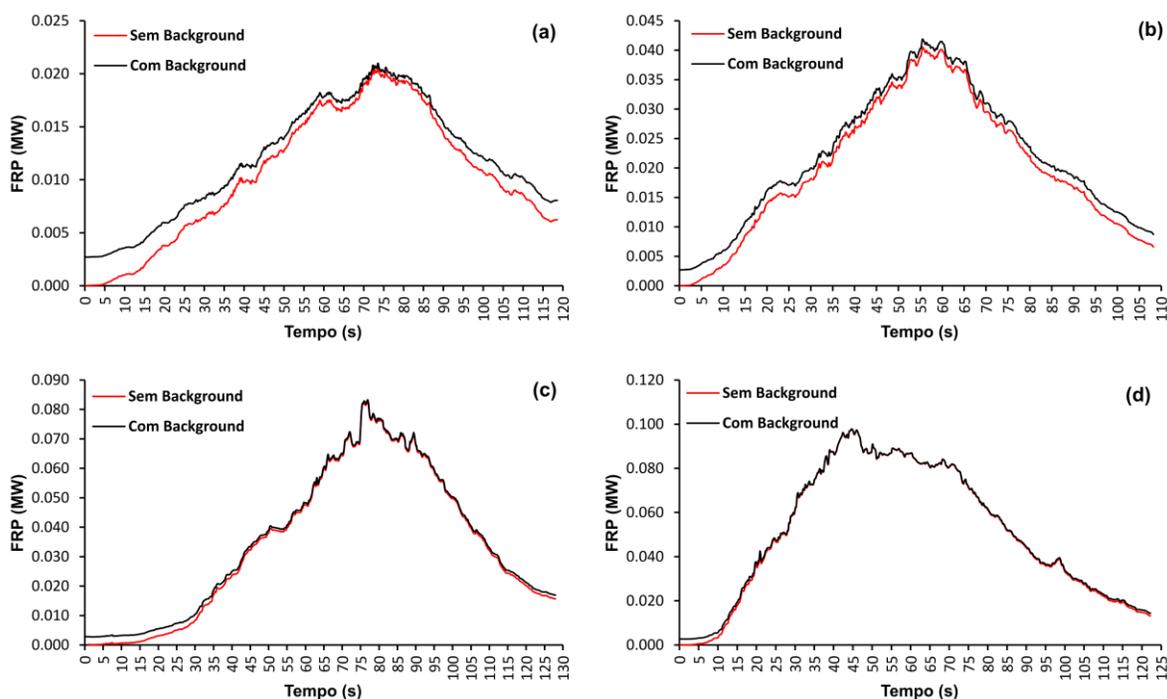
**Figura 5. Estimativa da FRP no nadir ao longo do processo de combustão para uma amostra de 150 gramas de palha de cana-de-açúcar.**

Em seguida ao período de liberação máxima a FRP decai, pois diminui a quantidade de biomassa a ser consumida e inicia-se o estado de brasa (*smoldering*) na amostra em torno de 125 segundos. De acordo com Wooster *et al.* (2005), na fase *smoldering*, que pode durar longos períodos de tempo dependendo do tipo e da quantidade de biomassa, existe uma tendência a perder-se menos biomassa em relação à FRP liberada. Isto ocorre devido à FRP estar diretamente

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

relacionada à temperatura e, enquanto que a quantidade de biomassa disponível nesta fase é pequena, a temperatura ainda é alta.

Em relação à influência do *background* na estimativa da FRP, as estimativas que consideram o *background* foram, sempre, maiores do que as estimativas que excluíram o *background*. A Figura 6 compara a FRP estimada para 4 amostras, com e sem o *background* e representativas das demais amostras do mesmo peso, concentradas respectivamente em 25 %, 50 %, 75 % e 100 % da área composta pelos 4 quadrantes. Nota-se primeiramente que o início das estimativas da FRP com *background* é sempre maior que zero, uma vez que se considerou a FRP estimada com a temperatura da palha da cana-de-açúcar nos *pixels* sem fogo (temperatura menor que 80° C). Ainda, para todas as amostras analisadas com e sem o *background*, a FRP emitida foi pequena, pois a quantidade de biomassa disponível para a queima e a área queimada eram pequenas, atingindo valor máximo em torno de 0,1 MW.

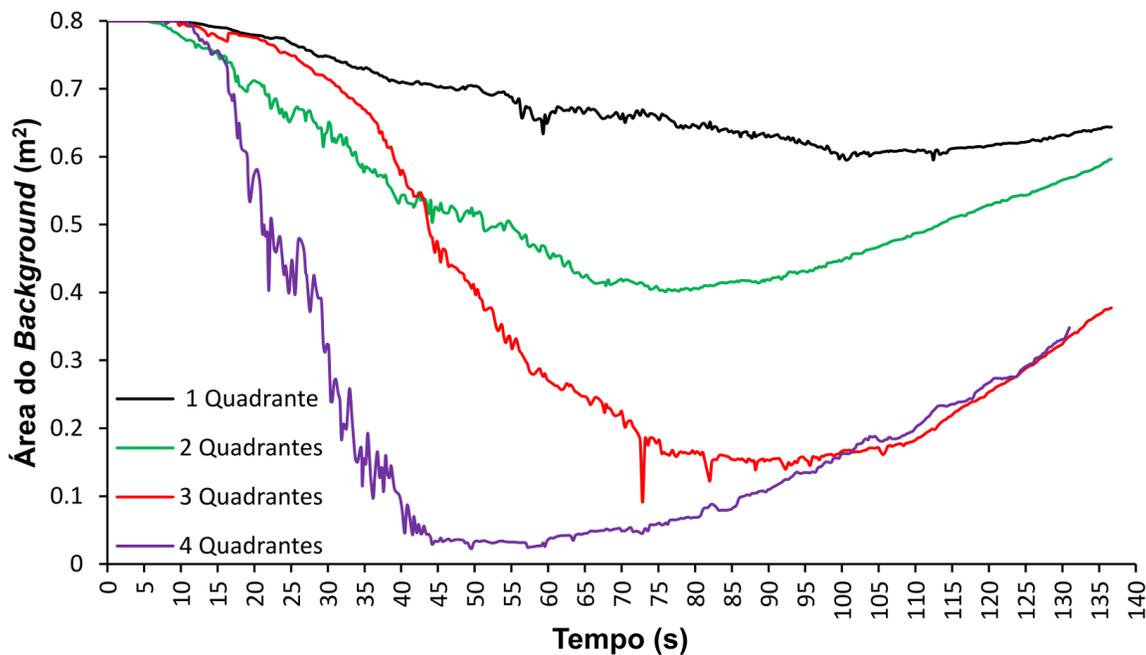


**Figura 6. Comparação da FRP estimada para 4 amostras diferentes preenchendo, respectivamente, 25 % (7(a)), 50 % (7(b)), 75 % (7(c)) e 100 % (7(d)) da área composta pelos 4 quadrantes.**

Para as amostras concentradas em 25 % da área (Figura 6(a)), a influência do *background* é maior, principalmente nos segundos iniciais, correspondente ao espalhamento do fogo pela amostra, e constata-se que até mesmo no momento de máxima emissão (cerca de 82 segundos após o início do fogo) ainda existe a contribuição do *background* na estimativa da FRP; conforme a combustão chega ao fim e a temperatura começa a diminuir o *background* volta a aumentar a estimativa da FRP. Esse é o mesmo padrão encontrado para as amostras em 50 % da área total (Figura 6(b)). Para as amostras preenchendo 75 % da área (Figura 6(c)), observa-se que a estimativa da FRP com o

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

*background* é maior no início da queima, entretanto com o espalhamento do fogo pela amostra, a partir de 50 segundos, o *background* pouco contribuiu para a FRP, pois poucos *pixels* apresentavam temperatura inferior a 80° C, o que foi constatado até o momento em que a amostra entrou na fase *smoldering*. Com a amostra preenchendo totalmente a área dos quadrantes, a influência do *background* é ainda menor, o que é evidente ao se analisar a Figura 6(d), em que a partir de 20 segundos a FRP com e sem *background* é praticamente a mesma, sendo que no momento de máxima emissão menos de 3 % da área analisada estava com temperatura menor que 80° C, como demonstrado na Figura 7, que apresenta a área considerada como *background* ao longo do processo de combustão para as mesmas amostras presentes na Figura 6.

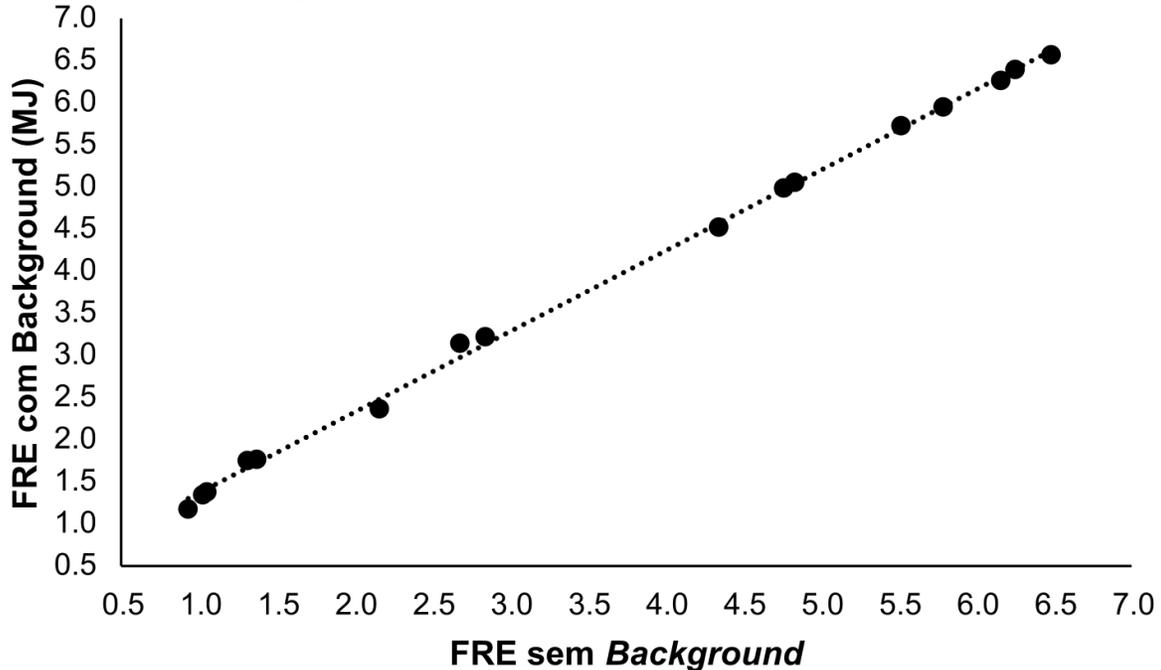


**Figura 7. Área considerada como *background* para as amostras apresentadas na Figura 6.**

Nos segundos iniciais, todas as amostras apresentam a mesma área considerada como *background* (0,8 m<sup>2</sup>), que corresponde à área total dos 4 quadrantes. Conforme o fogo se espalha sobre as amostras, a área do *background* diminui, chegando a representar, no momento em que a emissão da FRP é máxima 82 %, 48 %, 15 % e 3 % da área total com as amostras preenchendo, respectivamente, 1, 2, 3 e 4 quadrantes. Em seguida, de acordo com o fim da combustão e a diminuição da temperatura, o *background* volta a aumentar para todas as amostras. Segundo Freeborn *et al.* (2008), em queimadas que ocorrem na natureza o *background* tem maior influência durante a fase *smoldering* e depende do tipo de combustível, o que pode afetar o desempenho dos algoritmos que estimam a FRP a partir dos dados coletados por sensores orbitais. Quando são utilizadas estimativas derivadas de sensores orbitais pode ocorrer em um mesmo *pixel* a combustão em diferentes fases (fase chama, fase chama+*smoldering* e fase *smoldering*) de acordo com o avanço da frente de fogo, e, quando a fase *smoldering* se torna dominante, pode ocorrer a influência de áreas onde a combustão já ocorreu na estimativa da FRP, situação que pode prejudicar sua acurácia (WOOSTER *et al.*, 2005).

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

Em relação à influência do *background* na FRE, a Figura 8 apresenta a comparação da FRE com e sem o *background* para cada uma das amostras analisadas.



**Figura 8. Comparação entre a FRE sem o *background* e ao se considerar o *background* na sua estimativa para todas as amostras analisadas.**

Para as amostras concentradas em 25 % da área total, o *background* aumentou a FRE das amostras em média 30 %; com as amostras concentradas em 50% da área a FRE aumentou em média 18 %; em 75 % da área preenchida com as amostras a FRE foi acrescida em média 4 % e com as amostras preenchendo totalmente a área dos 4 quadrantes a FRE foi, em média, 2 % maior. Considerando todas as amostras a FRE com o *background* foi em média 13 % maior do que a FRE sem o *background*. Ainda, deve-se salientar que os valores de FRE encontrados foram um pouco mais baixos do que o esperado, o que pode ter sido causado pelo teor de umidade das amostras. As amostras utilizadas no experimento de combustão em pequena escala foram expostas ao sol para secagem e apresentaram teor de umidade de 18,58 %, estimado em laboratório na EMBRAPA Meio Ambiente após o experimento a partir de algumas amostras sobressalentes que não foram utilizadas. Nos experimentos conduzidos por Wooster *et al.* (2005) e Freeborn *et al.* (2008) as amostras apresentaram teor de umidade de 12 % e 7 %, respectivamente. De acordo com Riggan *et al.* (2004) e SMITH *et al.*, 2013, a presença de umidade na vegetação influencia diretamente na redução da FRP e da FRE, já que nesse caso as temperaturas encontradas são menores e essas duas variáveis dependem diretamente da temperatura elevada a quarta potência.

A análise estatística dos resultados apresentados na Figura 8 mostrou que a hipótese inicial que a média da FRE com e sem *background* é igual foi rejeitada a 5 % de acordo com teste t-Student tanto para o teste unicaudal quanto para o bicaudal (tabela 2), ou seja, existe diferença estatística entre a FRE estimada com e sem o *background*. Por fim, ao se considerar as queimadas em ambiente natural, o *background* pode ter efeitos ainda maiores na estimativa da FRP, pois no

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

experimento foi considerada uma temperatura fixa e baixa para o *background*, e, na natureza, sua temperatura pode ser muito maior, pois ele pode ser composto, por exemplo, de uma área que já queimou e ainda apresenta alta temperatura.

**Tabela 2. Resultados do Teste t-Student pareado para a média da FRE com e sem o background.**

	<i>FRE sem Background</i>	<i>FRE com Background</i>
Média	3,60	3,86
Variância	4,54	4,13
Observações	16	16
Correlação de Pearson	0,999	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de Liberdade	15	
Estatística t	-8,11	
Valor-P (T<=t) unicaudal	0,00000036	
t crítico uni-caudal	1,75	
Valor-P (T<=t) bi-caudal	0,00000072	
t crítico bicaudal	2,13	

## 5. Conclusões

Os resultados encontrados no experimento de combustão em pequena escala permitiram determinar a influência do *background* na estimativa da FRP e na FRE, apesar das limitações encontradas. Verificou-se que o *background* introduziu um erro médio de 13 % nas estimativas de FRE obtidas, resultado significativo de acordo com análise estatística, e que quanto maior a quantidade de *background* maior será o erro introduzido, já que com as amostras concentradas em 75 % da área total o *background* aumentou a FRE em média 30 %, enquanto que com as amostras preenchendo totalmente a área o incremento foi de 2 %. Contudo, o ideal nesse caso seria realizar experimentos de campo para melhor compreender esse fenômeno, visto que o efeito do *background* em condições naturais pode ser ainda maior, pois a temperatura do *background* considerada no experimento de combustão em pequena escala foi fixa e baixa, e em queimadas que ocorrem na natureza essa temperatura pode ser muito mais elevada.

## Referências bibliográficas

- Andela, N.; Van der Werf, G. R.; Kaiser, J. W.; Van Leeuwen, T. T.; Wooster, M. J.; Lehmann, C. E. R. (2016): “Biomass burning fuel consumption dynamics in the (sub)tropics assessed from satellite”, *Biogeosciences Discussions*, 13, 12, pp. 1-30.
- Aguiar, D. A.; Rudorff, B. F. T.; Silva, W. F.; Adami, M.; Mello, M. P. (2011): “Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo, Brazil”, *Remote Sensing*, 3, 12, pp. 2682-2703.
- Andreae, M. O.; Merlet, P. (2001): “Emission of trace gases and aerosols from biomass burning”, *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 4, pp. 955-966.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

- Archibald, S.; Staver, A. C.; Levin, S. A. (2011): “Evolution of human-driven fire regimes in Africa”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, pp. 847-852.
- Beuchlé, R.; Grecchi, R. C.; Shimabukuro, Y. E.; Seliger, R.; Eva, H. D.; Sano, E. E.; Achard, F. (2015): “Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach”, *Applied Geography*, 58, pp. 116-127.
- Bowman, D. M.; Balch, J. K.; Artaxo, P.; Bond, W. J.; Carlson, J. M.; Cochrane, M. A.; D'Antonio, C. M.; Defries, R. S.; Doyle, J. C.; Harrison, S. P., et al. (2009): “Fire in the earth system”, *Science*, 324, pp. 481-484.
- Cardozo, F. S.; Pereira, G.; Shimabukuro, Y. E.; Moraes, E. C. (2012): “Validation of MODIS MCD45A1 product to identify burned areas in Acre state - Amazon forest”, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 6741-6744.
- Cardozo, F. S.; Pereira, G.; Mataveli, G. A. V.; Shimabukuro, Y. E. (2015): “Avaliação dos modelos de emissão 3BEM e 3BEM\_FRP no estado de Rondônia”, *Revista Brasileira de Cartografia*, 67, 5, pp. 1247-1264.
- Coutinho, L. M. (1990): “Fire in the ecology of the Brazilian cerrado”, In Goldammer, J.G. (Springer-Verlag): New York, pp.82-105.
- De Araújo, F. M.; Ferreira, L. G.; Arantes, A. E. (2012): “Distribution patterns of burned areas in the Brazilian biomes: An analysis based on satellite data for the 2002–2010 period”, *Remote Sensing*, 4, pp. 1929-1946.
- De Araújo, F. M.; Ferreira, L. (2015): “Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A in the Brazilian savanna”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 36, pp. 94-102.
- Dozier, J. (1981): “A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution”, *Remote Sensing of Environment*, 11, pp. 221-229.
- Eckman, T. C.; Roberts, D. A.; Still, C. J. (2008): “Using multiple endmember spectral mixture analysis to retrieve subpixel fire properties from MODIS”, *Remote Sensing of Environment*, 112, 10, pp. 3773-3783.
- Eckman, T. C.; Still, C. J.; Roberts, D. A.; Michaelsen, J. C. (2010): “Variations in subpixel fire properties with season and land cover in Southern Africa”, *Earth Interactions*, 4, 6, pp. 1-29.
- Fearnside, P. M. (2000): “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*, 46, pp. 115-158.
- Flir. (2016): “Manual da FLIR: Modelo A310”. Disponível em: <http://www.flir.com/BR/>. Acesso em 20 ago. 2016
- França, D. A.; Longo, K. M.; Neto, T. G. S.; Santos, J. C.; Freitas, S. R.; Rudorff, B. F. T.; Cortez, E. V.; Anselmo, E.; Carvalho junior, J. A. (2012): “Pre-harvest sugarcane burning: determination of emission factors through laboratory measurements”, *Atmosphere*, 3, 1, pp. 164-180.
- Freeborn, P. H.; Wooster, M.J.; Hao, W.M.; Ryan, C.A.; Nordgren, B.L.; Baker, S.P.; Ichoku, C. (2008): “Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires”, *Journal of Geophysical Research*, 113, 01, pp. 1-17.
- Freeborn, P. H.; Wooster, M. J.; Roy, D. P.; Cochrane, M. A. (2014): “Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation”, *Geophysical Research Letters*, 41, pp. 1988-1994.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): "Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Dias, M. A. F. S.; Chatfield, R.; Dias, P. L. S.; Artaxo, P.; Andreae, M.; Grell, G. A.; Rodrigues, L.; Fazenda, A.; Panetta, J. (2007): "The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 1: Model description and evaluation", *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 7, 1, pp. 8525-8569.

Giglio, L.; Kendall, J.; Mack, R. (2003): "A multi-year active fire dataset for the tropics derived from the TRMM VIRS", *International Journal of Remote Sensing*, 24, 22, pp. 4505-4525.

Giglio, L.; Van der Werf, G. R.; Randerson, J. T.; Collatz, G. J.; Kasibhatla, P.S. (2006): "Global estimation of burned area using MODIS active fire observations", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, pp. 957-974.

Giglio, L.; Schroeder, W.; Justice, C. O. (2016): "The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products". *Remote Sensing of Environment*, 178, pp. 31-41.

Hantson, S.; Padilla, M.; Corti, D.; Chuvieco, E. (2013): "Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence", *Remote Sensing of Environment*, 131, 1, pp. 152-159.

Huang, S.; Liu, H.; Dahal, D.; Jin, S.; Li, S.; Liu, S. (2015): "Spatial variations in immediate greenhouse gases and aerosol emissions and resulting radiative forcing from wildfires in interior Alaska", *Theoretical and Applied Climatology*, 123, pp. 581-592

Ichoku, C.; Giglio, L.; Wooster, M.; Remer, L. (2008): "Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy", *Remote Sensing of Environment*, 112, 6, pp. 2950-2962.

Ichoku, C.; Kahn, R.; Chin, M. (2012): "Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling", *Atmospheric Research*, 111, pp. 1-28.

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. (2012): "Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power", *Biogeosciences*, 9, 1, pp. 527-554.

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

Lauk, C.; Erb, K. H. (2009): "Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes", *Ecological Economics*, 69, 2, pp. 301-309.

Paugam, R.; Wooster, M. J.; Roberts, G. (2013): "Use of thermal image data for airborne mapping of fire radiative power and energy and flame front rate of spread", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 6, pp. 3385-3399.

Pereira, G.; Freitas, S. R.; Moraes, E. C.; Ferreira, N. J.; Shimabukuro, Y. E.; Rao, V. B.; Longo, K. M. Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations. *Atmospheric Environment*, v.43, n.40, p. 6388-6397, 2009.

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. (2012): "Determinação e modelagem da taxa de consumo de biomassa queimada", *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 1, pp. 13-22.

Pereira, G.; Siqueira, R.; Rosário, N. E.; Longo, K. L.; Freitas, S. R.; Cardozo, F. S.; Kaiser, J. W.; Wooster, M. J. (2016): "Assessment of fire emissions inventories during the south american biomass burning analysis (SAMBBA) experiment", *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, pp. 1-23.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

- Peterson, D.; Wang, J.; Ichoku, C.; Hyer, E.; Ambrosia, V. (2013): “A sub-pixel-based calculation of fire radiative power from MODIS observations: 1 Algorithm development and initial assessment”, *Remote Sensing of Environment*, 129, pp. 262-279.
- Ramos Neto, M. B.; Pivello, V. R. (2000): “Lightning fires in a Brazilian savanna national park: Rethinking management strategies”, *Environmental Management*, 26, pp. 675-684.
- Riggan, P.; Tissell, R.; Lockwood, R.; Brass, J.; Pereira, J.; Miranda, H.; Campos, T.; Higgins, R. (2004): “Remote measurement of energy and carbon flux from wild-fires in Brazil”, *Ecological Application*, 14, 3, pp. 855-872.
- Roberts, G.; Wooster, M. J.; Perry, G. L. W.; Drake, N.; Rebelo, L. M.; Dipotso, F. (2005): “Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery”, *Journal of Geophysical Research*, 110, D21, pp. 1-20.
- Schroeder, W., Csizsar, I., Giglio, L., Schmidt, C. C. (2010): “On the use of fire radiative power, area, and temperature estimates to characterize biomass burning via moderate to coarse spatial resolution remote sensing data in the Brazilian Amazon”, *Journal of Geophysical Research*, 115, D21121, pp. 1-10.
- Seiler, W.; Crutzen, P.J. (1980): “Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning”, *Climate Change*, 2, 3, pp. 207-248.
- Shi, Y.; Matsunaga, T.; Saito, M.; Yamaguchi, Y.; Chen, X. (2015): “Comparison of global inventories of CO<sub>2</sub> emissions from biomass burning during 2002-2011 derived from multiple satellite products”, *Environmental Pollution*, 206, pp. 479-487.
- Shimabukuro, Y. E.; Pereira, G.; Cardozo, F. S.; Stockler, R.; Freitas, S.R.; Coura, S. M. C. (2013): “Biomass burning emission estimation in amazon tropical forest”. In Alcaraz-Segura (Coord.), D.; Di Bella, C. M.; Straschnoy, J. V: *Earth observation of ecosystem services*. Boca Raton, United States of America, CRC Press, pp. 125-148.
- Shvetsov, E. G.; Ponomarev, E. I. (2015): “Estimating the influence of external environmental factors on fire radiative power using satellite imagery”, *Contemporary Problems of Ecology*, 8, pp. 337-343.
- Smith, A. M. S.; Tinkham, W. T.; Roy, D. P.; Boschetti, L.; Kremens, R. L.; Kumar, S. S.; Sparks A. M.; Falkowski, M. J. (2013): “Quantification of fuel moisture effects on biomass consumed derived from fire radiative energy retrievals”, *Geophysical Research Letters*, 40, pp. 6298-6302.
- Surawski, N. C.; Sullivan, A. L.; Meyer, C. P.; Roxburgh, S. H.; Polglase, P. J. (2015): “Greenhouse gas emissions from laboratory-scale fires in wildland fuels depend on fire spread mode and phase of combustion”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, pp. 5259-5273.
- Van der Werf, G. R.; Randerson, J. T.; Giglio, L.; Collatz, G. J.; Kasibhatla, P. S.; Arellano, A. F. (2006): “Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1, pp. 3423-3441.
- Veraverbeke, S.; Stavros, E. N.; Hook, S. J. (2014): “Assessing fire severity using imaging spectroscopy data from the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) and comparison with multispectral capabilities”, *as\z cv*, 154, pp. 153-163.
- Vermote, E.; Ellicott, E.; Dubovik, O.; Lapionok, T.; Chin, M.; Giglio, L.; Roberts, G.J. (2009): “An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power”, *Journal of Geophysical Research*, 114, 18, pp. 1984-2012.
- Wooster, M. J. (2002): “Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires”, *Geophysical Research Letters*, 29, 21, pp. 231-234.

Verola Mataveli, G. A., Pereira, G., Moraes E. C., y Oliveira B. S. (2017): “Análise do efeito de background na estimativa da potência e da energia radiativa do fogo”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 29-48. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.443>

---

Wooster, M. J.; Zhukov, B.; Oertel, D. (2003): “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*, 86, 1, pp. 83-107.

Wooster, M. J.; Roberts, G.; Perry, G.; Kaufman, Y. J. (2005): “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*, 110, 24, pp. 83-107.

Wooster, M. J.; Freeborn, P. H.; Archibald, S.; Oppenheimer, C.; Roberts, G. J.; Smith, T. E. L.; Govender, N.; Burton, M.; Palumbo, I. (2011): “Field determination of biomass burning emission ratios and factors via open-path FTIR spectroscopy and fire radiative power assessment: head fire, backfire and residual smouldering combustion in African savannahs”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 22, pp. 11591-11615.

Xu, W.; Wooster, M. J.; Roberts, G.; Freeborn, P. (2010): “New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America”, *Remote Sensing of Environment*, 114, 9, pp. 1876-1895.