BCG - Boletim de Ciências Geodésicas - On-Line version, ISSN 1982-2170
http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200021

Artigo

RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE VISADA E A ESTIMATIVA DA POTÊNCIA RADIATIVA DO FOGO

Relationship between the viewing angle and the Fire Radiative Power estimation

Guilherme Augusto Verola Mataveli [1]

Gabriel Pereira [2]

Elisabete Caria Moraes [1]

Bruno Silva Oliveira [1]

Francielle da Silva Cardozo [1]

1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
Email: mataveli@dsr.inpe.br; bete@dsr.inpe.br; bruno.so@dsr.inpe.br, cardozo@dsr.inpe.br

2 Universidade Federal de São João del- Rei - UFSJ
Departamento de Geociências. Rodovia BR-494 - km 194 - 196
São João del Rei – MG, Brasil.
Email: pereira@ufsj.edu.br

Resumo:

As queimadas atingem grandes áreas, constituindo-se como um agente modelador dos ecossistemas e contribuem para o acúmulo de gases e aerossóis na atmosfera. Atualmente, o sensoriamento remoto é a principal fonte de dados para estudar as queimadas devido à aquisição de dados globais com uma periodicidade constante. No entanto, são necessárias mais informações sobre as queimadas além da sua localização espacial, dentre elas a biomassa queimada. O método mais utilizado para isso atualmente é derivado da Potência Radiativa do Fogo (FRP), já que a energia emitida como radiação eletromagnética durante a combustão pode ser diretamente relacionada com a biomassa queimada. Contudo, alguns fatores introduzem erros nas estimativas de FRP, como o ângulo de visada. Assim, para avaliar a influência dessa variável na FRP foi realizado um experimento de combustão em pequena escala utilizando como biomassa a palha da cana-de-açúcar. Ainda, foi determinado o coeficiente de biomassa queimada para a cana-de-açúcar. As estimativas obtidas permitiram concluir que a FRP diminui com o aumento do ângulo de visada, e, sendo assim, o ângulo de visada foi considerado no coeficiente de biomassa queimada. Pretende-se futuramente empregar os resultados encontrados para estimar a biomassa queimada e suas emissões provenientes da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Queimadas; Potência Radiativa do Fogo; Ângulo de Visada; Experimento de Combustão em Pequena Escala.

Abstract:

Fire affects large areas around the world, acting as a modeler of ecosystems and contributing to the accumulation of gases and aerosols in the atmosphere. Nowadays, remote sensing is the main source of data for studying fires, due to the possibility of acquiring global data with constant frequency. However, it is necessary to obtain more information about fires besides the spatial location, such as the amount of biomass burning. Currently, the most widely used method to estimate biomass burning is derived from Fire Radiative Power (FRP), on the assumption that energy emitted as electromagnetic radiation during combustion could be directly related to biomass burning. However, some factors can introduce errors in FRP, such as viewing angle. To determine the influence of viewing angle in FRP, a small scale experiment was conducted using sugarcane straw as biomass. Still, it was determined the biomass burning coefficient for sugarcane. The results showed that FRP tends to decrease according to the increasing of the viewing angle, and, therefore, the viewing angle was considered for the determination of the biomass burning coefficient. It is intended in the future to apply the results in order to estimate biomass burning and emissions from sugarcane pre-harvest burning.

Keywords: Biomass Burning; Fire Radiative Power; Viewing Angle; Small-scale Combustion Experiment.

1. Introdução

A queima de biomassa compreende a combustão de todos os tipos de material orgânico (Ichoku et al., 2012) e representa uma importante fonte de emissão de aerossóis e gases traços para a atmosfera, influenciando, dessa forma, o clima, principalmente em escala regional, além de ser um fator introdutório de mudanças na paisagem local e regional. Desta forma, torna-se importante quantificá-la com o intuito de compreender seus impactos nos diferentes biomas e no clima (Schroeder et al., 2014). Quanto à sua origem, 90% das queimadas são ocasionadas pelo homem e os 10% restantes são relacionados a acidentes ou causas naturais, como raios e combustão espontânea (Andreae e Merlet, 2001). Estima-se que entre 3547 e 3938 teragramas (Tg) de biomassa seca são queimadas anualmente, sendo sua maior concentração em regiões de savana no continente africano (Lauk e Erb, 2009).

Durante muitas décadas, as estimativas de biomassa queimada eram feitas a partir de experimentos e medições *in situ* (Andreae e Merlet, 2001), contudo ao considerar um fenômeno dinâmico como as queimadas, a cobertura espacial e temporal desse tipo de abordagem é limitada. Nos últimos anos, com o avanço no sensoriamento remoto orbital, os dados provenientes de sensores orbitais se tornaram a principal fonte de dados para estimar a quantidade de biomassa queimada e as respectivas emissões de gases traços e aerossóis (Freitas et al., 2007; Ichoku et al., 2008; Hantson et al., 2013). Esta característica torna-se viável devido à aquisição de dados de forma sistemática e em nível global.

Tradicionalmente, a quantidade de biomassa queimada é estimada a partir da Equação 1 (Seiler e Crutzen, 1980).

$$BQ = A.B.\alpha \tag{1}$$

em que BQ é a quantidade de biomassa queimada (kg), A é a área queimada (km^2), B é a biomassa disponível para queima ($kg.km^{-2}$) e α é o fator de combustão.

A principal dificulade em estimar a biomassa queimada a partir da Equação 1 está nos termos da equação *A e B*, já que existem incertezas presentes nas estimativas de área queimada com o uso de produtos derivados de sensores orbitais e que podem prejudicar as estimativas de biomassa queimada (Van der Werf et al., 2006; Pereira et al., 2012).

Neste contexto, desenvolvem-se vários métodos para estimar a biomassa queimada (Freeborn et al., 2008). Um dos métodos mais utilizados atualmente para estimar a biomassa queimada é derivado da Potência Radiativa do Fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP) (Roberts et al., 2005; Wooster et al., 2005; Freeborn et al., 2008; Vermote et al., 2009; Pereira et al., 2012). A FRP é definida como a taxa na qual a energia é emitida pelo fogo na forma de radiação (Wooster et al., 2003). Esse método baseia-se em Wooster (2002), que testou as relações entre a FRP e a biomassa queimada em um experimento de combustão em pequena escala, chegando à conclusão que existia de uma relação linear entre essas variáveis. Contudo, assim como na maioria das estimativas obtidas por sensoriamento remoto, deve-se atentar aos fatores que introduzem erros na estimativa da FRP e que, portanto, prejudicam sua precisão.

De acordo com Ichoku et al. (2012), entre as principais fontes de erro na estimativa da FRP pode-se citar o ângulo de visada. Com o aumento do ângulo de visada, o tamanho do *pixel* aumenta (Giglio et al., 2006) e, ainda, a precisão dos algoritmos de detecção de anomalias termais que originam os produtos de fogo ativo pode ser comprometida. Em um estudo preliminar, a diferença entre a FRP estimada no nadir e com um ângulo de visada de 40 graus foi de até 22% para uma mesma amostra de biomassa (Paugam et al., 2013).

Portanto, devido ao seu amplo uso pela comunidade científica não somente para estimar quantidade de biomassa queimada, mas também para a estimativa de gases traços e aerossóis associados à queima de biomassa e como dados de entrada em modelos ambientais e climatológicos (Xu et al., 2010), torna-se necessário compreender os erros causados pelo ângulo de visada na estimativa da FRP. Dentro desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar a influência do ângulo de visada na estimativa da FRP a partir de um experimento de combustão em pequena escala.

2. Métodos para estimar a Potência Radiativa do Fogo

Visando a maior compreensão do fenômeno das queimadas, Kaufman et al. (1996) introduziram o conceito de FRP, e posteriormente foi proposto que a estimativa da quantidade de energia emitida como radiação eletromagnética durante o processo de combustão seria capaz de ser diretamente relacionada com a quantidade de biomassa queimada (Wooster, 2002).

A FRP (em MWatts) pode ser estimada ao se conhecer a distribuição da temperatura no *pixel*, como é apresentado na Equação 2 (Kaufman et al., 1996).

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

em que ε é a emissividade, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \times 10^{-8} J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$), A_n representa a área fracional da enésima componente termal (m^2) e T_n é a temperatura da enésima componente (K).

Porém, a estimativa da FRP a partir da Equação 2 apresenta dificuldades, uma vez que a queimada dificilmente ocorre em toda área de um *pixel* imageado por um sensor orbital, prejudicando, desta forma, o cálculo da área do componente fogo em cada *pixel* e a estimativa da temperatura do componente fogo, que apresentarão variações no subpixel (Eckman et al., 2010; Wooster et al., 2011).

Um dos primeiros métodos utilizados para caracterizar a temperatura e a área do componente fogo no subpixel foi introduzido por Dozier (1981). Este método, desenvolvido inicialmente para o sensor "Advanced Very High Resolution Radiometer" (AVHRR), explora a diferença existente na resposta dos canais centrados em 4 micrometros (µm) e 11µm para as altas temperaturas. Nesse método, o *pixel* é separado nos componentes fogo e *background* (porção do *pixel* em que não está ocorrendo a queimada), sendo as Equações 3 e 4 resolvidas em função da temperatura do fogo e do *background* e da área do *subpixel*.

$$L_{4\mu m} = A_f.B\left(\lambda_{4\mu m}, T_f\right) + \left(1 - A_f\right).B\left(\lambda_{4\mu m}, T_b\right) \tag{3}$$

$$L_{11\mu m} = A_f.B\left(\lambda_{11\mu m}, T_f\right) + \left(1 - A_f\right).B\left(\lambda_{11\mu m}, T_b\right) \tag{4}$$

em que L representa a radiância espectral ($W.m^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) nos canais centrados em 4µm e 11µm, $B(\lambda,T)$ é a função de Planck, A_f é a área do fogo (m²), λ é o comprimento de onda (µm) 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: o componente fogo tenha uma única temperatura; o 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 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 essas limitações, Kaufman et al. (1996) desenvolveram um método que utiliza apenas uma banda espectral para estimar a FRP, sem levar em consideração as componentes T_f e A_f. Nesse método, que é utilizado no produto de fogo ativo derivado do sensor "Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer" (MODIS), a FRP é estimada a partir da Equação 5:

$$FRP = 4,3.10^{-19}.\left(T^8_{f\,4\mu m} - T^8_{b4\mu m}\right).A_{real} \tag{5}$$

em que FRP é a potência radiativa do fogo (MW ou $MJ.s^{-1}$), 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^2).

Outro método que permite estimar a FRP a partir de apenas uma banda espectral foi proposto por Wooster et al. (2005). Nesse método, utilizado no produto de fogo ativo derivado do "Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager" (SEVIRI), a FRP é estimada empregando a radiância espectral na região do infravermelho médio, como apresentado na Equação 6.

$$FRP = \frac{A_{pixel}}{a}.\sigma.\varepsilon.\int_{\lambda f}^{\lambda i} B\left(\lambda, \mathrm{T}\right) d\lambda - L_b \tag{6}$$

em que A_{pixel} é o tamanho do *pixel* (km²), a é uma constante de calibração baseada na resposta espectral de cada sensor ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}.K^{-4}$) extraída de Wooster et al. (2005), L_b é a radiância

espectral do background, e λ_i e λ_f são o comprimento de onda inicial e final correspondentes a largura de banda do sensor (µm).

Com o uso dos métodos que utilizam apenas uma banda espectral, algumas pressuposições e limitações impostas pelos métodos bi-espectrais são superadas, como a ausência de erros de registro entre bandas de diferentes resoluções espaciais.

3. Coeficientes de biomassa queimada

A partir dos resultados encontrados por Wooster (2002), vários trabalhos foram realizados com o intuito de encontrar o coeficiente de biomassa queimada, que relaciona a FRP e a biomassa queimada. Assim, Wooster et al. (2005), Freeborn et al. (2008) e Pereira et al. (2012) realizaram experimentos de combustão em pequena escala para estimar essa relação a partir da queima controlada de quantidades conhecidas de biomassa. A análise da relação entre a FRP e a taxa de biomassa queimada (TBQ) originou as Equações 7, 8 e 9, respectivamente:

$$TBQ_{Savana} = 0,368.FRP \tag{7}$$

$$TBQ_{Floresta} = 0,453.FRP \tag{8}$$

$$TBQ_{Gramíneas} = 0,949.FRP \tag{9}$$

em que *TBQ* é a taxa de biomassa queimada (kg.s^{-1}), *FRP* é a potência radiativa do fogo (MW) e o coeficiente multiplicativo está em kg.MJ^{-1}.

Cabe ressaltar que as espécies vegetais utilizadas para se chegar às Equações 7, 8 e 9 eram distintas, sendo os coeficientes apresentados acima específicos para espécies vegetais da Savana Africana (Wooster et al., 2005), para espécies vegetais da floresta nativa Norte-americana (Freeborn et al., 2008) e para espécies vegetais do Pantanal e gramíneas (Pereira et al., 2012). Ainda, é importante salientar que para se chegar ao total de biomassa queimada é preciso integrar a *TBQ* ao longo do tempo de duração da queimada.

4. Materiais e métodos

4.1 Experimento de combustão em pequena escala

O experimento para analisar a influência do ângulo de visada na FRP a partir da queima de quantidades controladas de biomassa ocorreu nos dias 10/07/2013 e 11/07/2013 no Campus Tancredo Neves da Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ), com a colaboração da UFSJ e da EMBRAPA Meio Ambiente. Cabe aqui ressaltar que o tipo de biomassa utilizada durante o experimento de combustão em pequena escala foi a palha da cana-de-açúcar.

Para obter a temperatura durante a combustão das amostras e estimar a FRP, foi utilizado como instrumento uma câmera termal (Figura 1) fabricada pela empresa *FLIR Systems Incorporation*. O

modelo A310 possui um *frame* de 320x240 *pixels*, chegando à máxima temperatura captada de 1200º *Celsius* (ºC), 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. A FLIR A310 opera em 3 faixas de temperatura, entre -20ºC e 120ºC, entre 0ºC e 350ºC e entre 200ºC e 1200ºC, sendo que para cada faixa de temperatura existe uma calibração específica. Como a temperatura de uma queimada pode atingir mais de 900º C, a faixa de temperatura mais adequada para o experimento de combustão em pequena escala é a de 200ºC a 1200ºC. Porém, nessa faixa de temperatura as temperaturas menores que 80ºC não são discretizadas, devido à calibração e otimização do instrumento.

Figura 1: Estrutura utilizada durante o experimento de combustão em pequena escala.

Para calibração da câmera termal, foram adotadas como condições iniciais a faixa de temperatura de 200ºC a 1200ºC, temperatura atmosférica 19ºC 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 de 15º a uma frequência de 5 Hertz (Hz).

A Tabela 1 apresenta os ângulos de visada, os pesos e o número de amostras analisadas durante o experimento de combustão em pequena escala. Apesar de serem submetidas ao processo de combustão 156 amostras de palha de cana-de-açúcar, algumas foram perdidas ou removidas da análise inicial, como será discutido em seguida, sendo que no total foram analisadas 139 amostras.

Tabela 1: Peso de cada amostra, número de amostras para cada ângulo de visada e total de amostras utilizadas no experimento de combustão em pequena escala.

	Ângulo de Visada					
Peso da Amostra (g)	0°	10°	20°	30°	40°	Total de Amostras
50	5	5	5	5	6	26
75	5	5	5	5	6	26
100	5	5	5	5	6	26
150	5	5	5	5	6	26
175	5	5	5	5	6	26
200	5	5	5	5	6	26

Na Tabela 1 é possível verificar o maior número de amostras para o ângulo de visada de 40º, uma vez que essa ótica também foi utilizada para analisar a posição do início da combustão em relação ao sensor na estimativa da FRP. Durante o experimento, o início do processo de combustão sempre se iniciou com as chamas em direção ao sensor (*forward*), a fim de manter um padrão para as amostras, com exceção das 3 amostras em que o processo de combustão se iniciou com as chamas ao contrário do sensor (*backward*) para cada peso com ângulo de visada de 40º.

Ainda, evitou-se sempre a influência de alterações das variáveis velocidade do vento, umidade e contaminação por altas temperaturas nas estimativas. Durante as etapas envolvidas, utilizou-se uma estação meteorológica portátil para medir a velocidade do vento no momento da combustão de cada amostra. Apesar do bloqueio com tapumes de madeira para evitar a influência do vento, como se percebe pela Figura 1, algumas amostras foram influenciadas por essa variável, e foram, dessa forma, removidas da análise inicial e analisadas separadamente.

Para algumas amostras, notava-se claramente o teor mais alto de umidade, o que dificultava ou até mesmo impedia o início do processo de combustão. As amostras mais úmidas, assim como as amostras influenciadas pelo vento, também foram removidas da análise inicial e analisadas separadamente. Após o experimento, algumas amostras que estavam mais úmidas foram encaminhadas para análise laboratorial na EMBRAPA Meio Ambiente, a fim de analisar seu teor de umidade, que foi estimado em 18,58%, um valor alto quando comparado com experimentos semelhantes presentes em literatura.

Para evitar a 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 as outras três ficavam à espera esfriando, e só eram utilizadas novamente quando sua temperatura estava abaixo da temperatura mínima discretizada pela câmera termal (80ºC), considerando a faixa de temperatura entre 200ºC e 1200ºC.

4.2 Processamento dos dados coletados no experimento de combustão em pequena escala

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, a Energia Radiativa do Fogo (FRE, que corresponde à integração temporal da FRP), a área queimada e o tempo de combustão para cada uma das amostras.

A taxa na qual a energia é emitida pelo fogo na forma de radiação, ou FRP, para cada *pixel* (FRP_{Pixel}) em cada um dos *frames* gerados pela câmera termal foi estimada a partir da Equação 2 considerando a emissividade igual a 1. Cabe ressaltar que os *pixels* com temperatura inferior a 80ºC foram considerados como *background* e, portanto, não fizeram parte da estimativa da FRP_{Pixel}. Ainda, a área de cada *pixel* variava de acordo com a plataforma utilizada para expor as amostras à combustão, pois as mesmas apresentavam espessuras diferentes e, consequentemente, estavam a uma altura diferente em relação ao sensor.

Para a estimativa da FRP de cada *frame* (FRP_{Pixel}) utilizou-se a Equação 10:

$$FRP_{frame} = \sum FRP_{pixel} \tag{10}$$

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

Com base nas estimativas de FRP e seus respectivos horários de ocorrência, a FRE de cada amostra foi estimada pela Equação 11:

$$FRE = \frac{1}{2}.\sum_{i=1}^{n}\left(FRP_n + FRP_{n+1}\right).\Delta t \tag{11}$$

onde *FRE* representa energia radiativa de fogo (MJ) para cada amostra, FRP_n (MW) é a potência radiativa de fogo no *frame* n e FRP_{n+1} (MW) é a potência radiativa de fogo no próximo *frame*, enquanto Δt é o intervalo de tempo (s) entre as estimativas.

5. Resultados e discussão

A FRP estimada no nadir para uma amostra de 100 gramas é apresentada na Figura 2. 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 combustão crescente, a FRP máxima ocorreu aos 56 segundos desde o início do processo de combustão, chegando a valores próximos de 0,028 MW. Em seguida, a FRP diminui, pois a quantidade de biomassa a ser consumida no processo de combustão diminui e inicia-se o estado de brasa (*smoldering*) em torno de 100 segundos.

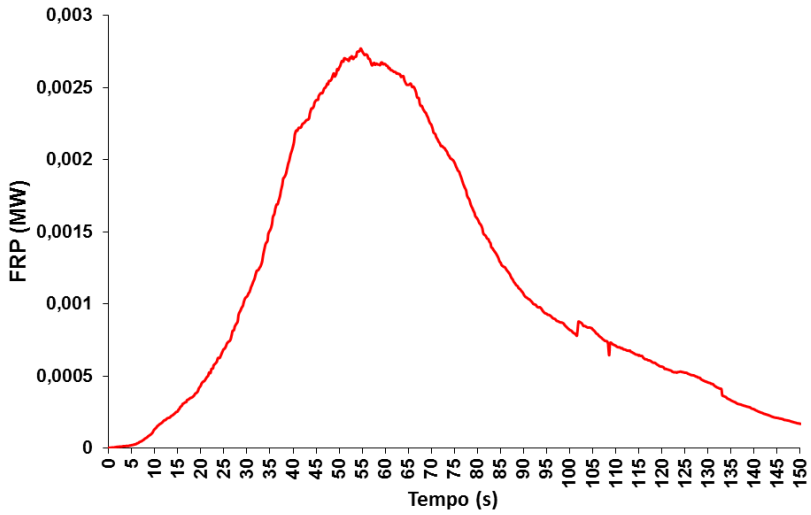

Figura 2: Estimativa da FRP no nadir ao longo do processo de combustão para uma amostra de 100 gramas.

Para Wooster et al. (2005), a fase *smoldering* pode durar por muito tempo de acordo com o tipo biomassa em combustão, e existe uma tendência a perder-se menos biomassa em relação à FRP liberada porque a FRP depende diretamente da temperatura, e, enquanto a quantidade de biomassa disponível nesta fase é pequena, a temperatura ainda é alta. Desta forma, a fase *smoldering* foi removida para as demais estimativas de FRP apresentadas nos resultados quando a mesma era evidente.

Para diferentes pesos e um mesmo ângulo de visada, a FRP tende a aumentar de acordo com o aumento da biomassa. A Figura 3 compara a FRP para 5 amostras com diferentes pesos e a câmera termal posicionada no nadir, sendo possível constatar que com o aumento da quantidade de biomassa disponível para queima a FRP máxima é maior.

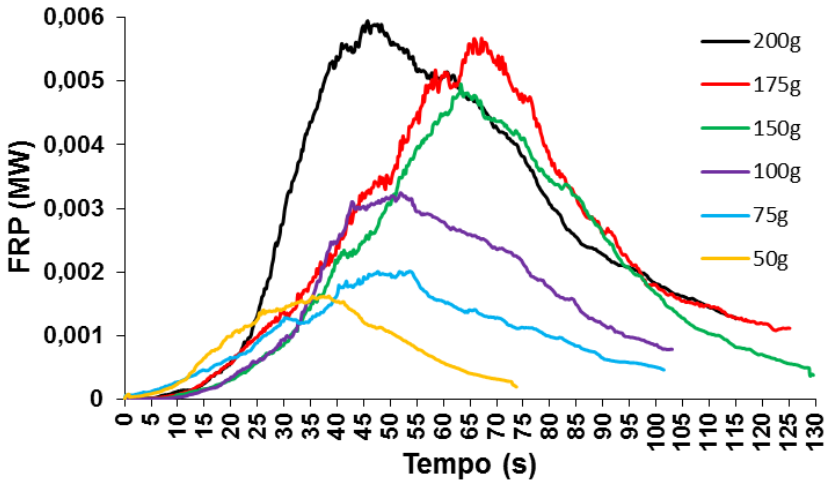

Figura 3: Estimativas da FRP estimada no nadir para amostras de diferentes pesos.

Nota-se ainda que para a amostra de 200 gramas a FRP é elevada rapidamente no início da combustão e entra em fase *smoldering* antes das amostras de 175 gramas e 150 gramas, o que pode ter ocorrido devido ao menor teor de umidade da amostra de 200 gramas, que encontrava-se mais

seca do que as demais amostras. Ainda em relação aos resultados apresentados na Figura 3, como a FRE é a integração temporal da FRP, mesmo que a amostra de 200 gramas entre na fase *smoldering* em menos tempo isso não significa que a FRE será menor em comparação às demais amostras, pois a FRP dessa amostra foi maior do que a FRP das outras amostras no tempo em que estava na fase chamas. As estimativas de FRE das amostras apresentadas na Figura 3 estão presentes na Figura 4.

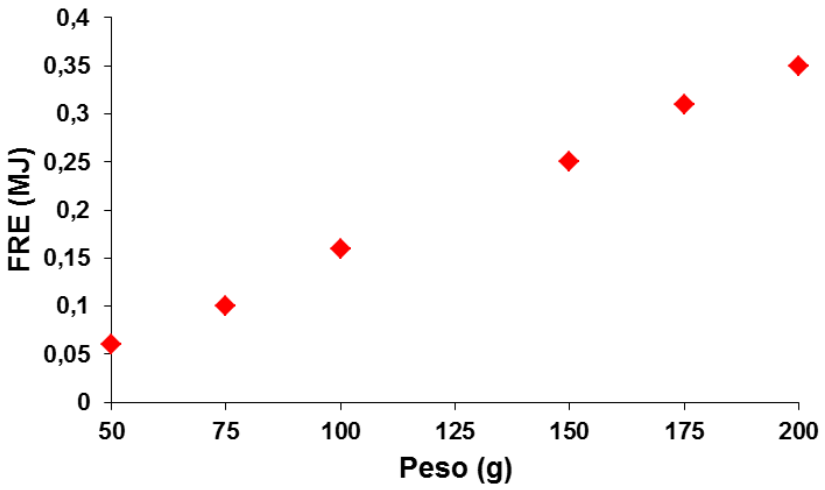

Figura 4: Estimativa da FRE para as amostras apresentadas na Figura.

A influência do vento na estimativa da FRP é analisada a partir da Figura 5. Nesta figura, são apresentadas as estimativas da FRP para duas amostras de 175 gramas com ângulo de visada de 30º, sendo que em uma das amostras a velocidade do vento medida pela estação meteorológica portátil foi 0 km/h e na outra amostra a velocidade do vento chegou a 3 km/h.

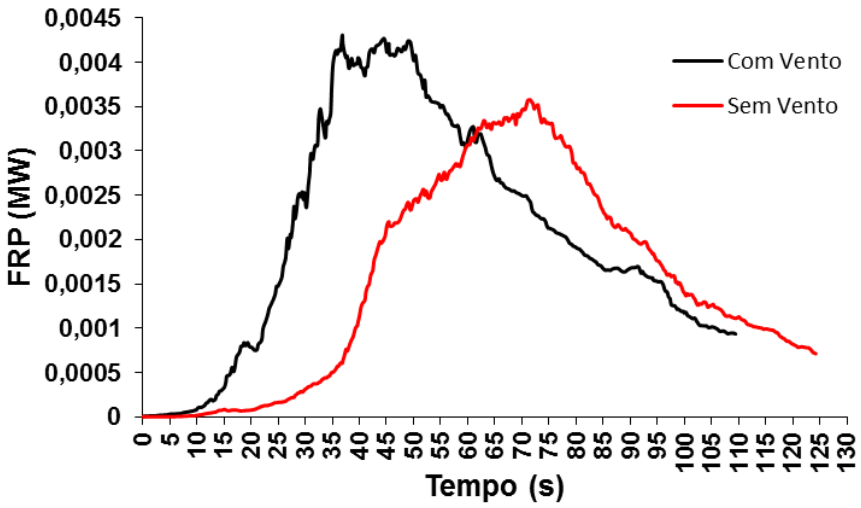

Figura 5: Estimativa da FRP durante o processo de combustão para duas amostras de 175 gramas, uma com influência do vento e outra amostra sem vento.

Para a amostra com vento, observa-se a influência da velocidade do vento em torno de 7 segundos, o que ocasiona o espalhamento do fogo mais rapidamente, e eleva a FRP nos segundos iniciais da combustão, chegando a atingir 0,0042 MW aos 38 segundos, e o início da fase *smoldering* inicia-

se em aproximadamente 107 segundos. Na amostra sem vento, percebe-se que o espalhamento do fogo pela amostra foi mais demorado, com início em cerca de 15 segundos e espalhamento efetivo por toda a amostra a partir de 38 segundos, aproximadamente o mesmo tempo em que a emissão de FRP da amostra com vento era máxima, sendo que a FRP máxima da amostra sem vento foi de 0,0035 MW, e o início da fase *smoldering* mais tardiamente, a partir de 124 segundos. Em relação à FRE, a amostra com vento foi 7 % maior do que a média das amostras de 175 gramas com ângulo de visada de 30º.

A comparação da FRP estimada no nadir para duas amostras de 150 gramas de palha de cana-de-açúcar, uma seca e uma úmida, é apresentada na Figura 6.

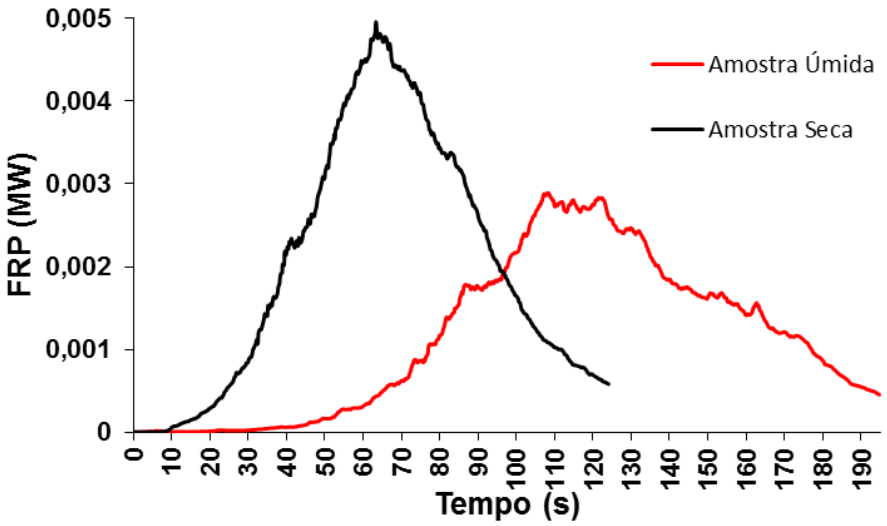

Figura 6: Estimativa da FRP no nadir para duas amostras de 150 gramas, sendo uma amostra seca e uma amostra úmida.

Em um primeiro momento, o que se destaca na Figura 6 é o tempo transcorrido na amostra úmida até chegar à fase *smoldering*, enquanto que a amostra seca entra em estado de brasa 120 segundos depois do início da combustão, a amostra úmida, de mesmo peso, demorou mais de 195 segundos para entrar em estado de brasa. Em relação ao espalhamento do fogo pela amostra, na amostra seca ele acontece em torno de 20 segundos, com a elevação rápida da FRP, que chega a atingir 0,005 MW. Para a amostra úmida, o espalhamento do fogo demora a ocorrer, e começa a elevar a FRP somente após 32 segundos depois do início do processo de combustão, com FRP máxima correspondente a 0,0028 MW em 110 segundos, pois a presença de umidade na vegetação influencia diretamente na redução da FRP, situação também encontrada por Riggan et al. (2004).

Em relação à FRE, a amostra úmida foi 7% menor do que a FRE média estimada para as amostras de 150 gramas no nadir, o que pode ser explicado pelo fato da temperatura da amostra úmida ser menor ao longo do processo de combustão, e a FRP, que origina a FRE, ser dependente da temperatura elevada à quarta potência.

Para a análise da posição da chama em relação ao sensor na estimativa da FRP, essa variável foi estimada para um mesmo peso com as chamas em direção ao sensor (*forward*) e com as chamas opostas à posição do sensor (*backward*) na visada de 40º. A Figura 7 compara duas amostras de 200 gramas para as situações descritas acima.

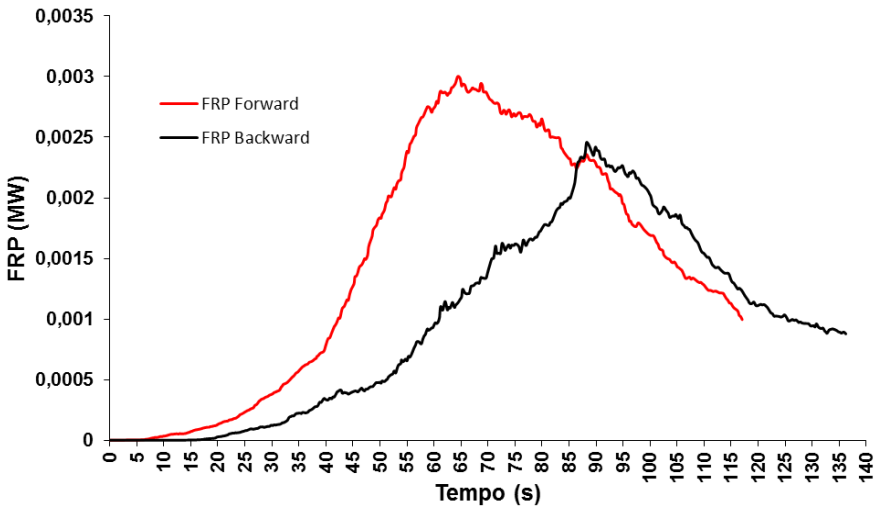

Figura 7: Estimativa da FRP com ângulo de visada de 40º para duas amostras, uma amostra na posição *forward* e a outra amostra na posição *backward*.

Nota-se que a FRP *backward* é menor em relação à FRP *forward*, sendo a FRP máxima emitida para a amostra na posição *forward* quase 20% maior que aquela na posição *backward* no momento da máxima emissão. Esse resultado pode ter sido causado pela fumaça resultante da queima, que na posição *backward* ficava entre a câmera termal e as amostras durante o processo de combustão, portanto a temperatura estimada pode não ser representativa do fogo, e sim uma mistura entre a chama e a fumaça. Para a análise da posição do sensor em relação à estimativa da FRP, o ideal seria utilizar dois sensores no experimento de combustão em pequena escala, pois essa metodologia isto permitiria uma comparação mais profunda das estimativas para uma mesma amostra.

Para o ângulo da visada, notou-se que para uma mesma quantidade de biomassa a FRP diminui de acordo com o aumento do ângulo. A Figura 8 compara a FRP de 5 amostras de 100 gramas, uma de cada ângulo de visada analisado.

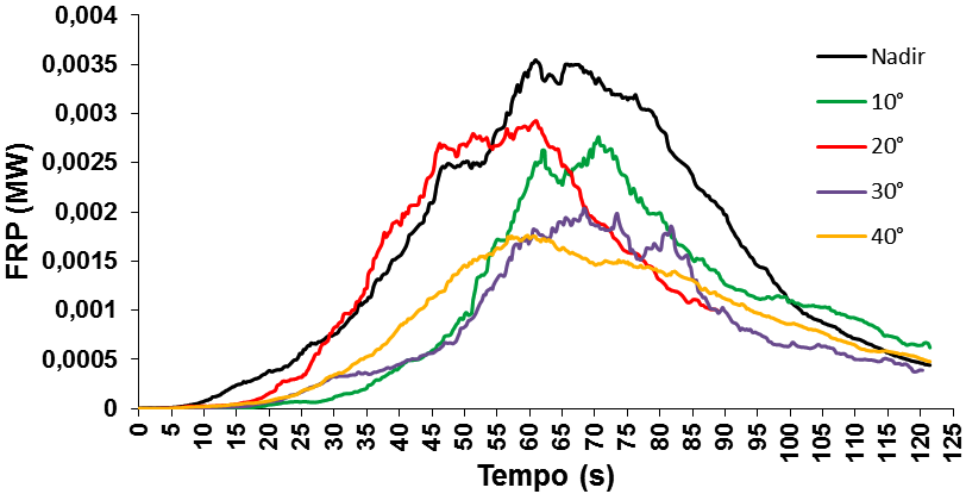

Figura 8: Estimativas da FRP para amostras de 100 gramas com diferentes ângulos de visada.

Ao comparar a FRP máxima emitida para as amostras presentes na Figura 8 percebe-se que no nadir ela é praticamente o dobro da FRP máxima emitida para 40 graus, pois, em média, menos energia é detectada por unidade de biomassa queimada conforme o ângulo de visada se torna mais

oblíquo (Freeborn et al. 2008). No nadir, a temperatura de um *pixel* com queimada seria maior do que a temperatura do mesmo *pixel* em um ângulo de visada mais oblíquo, já que o fogo é visto na vertical e, portanto, é mais intenso. Resultado semelhante foi encontrado por Freeborn et al. (2008), que estimaram a FRP e a área queimada de 21 amostras com dois sensores, um posicionado sempre no nadir e o outro fora do nadir, e chegaram à conclusão de que o campo de visada instantâneo (IFOV) do sensor influencia a estimativa da temperatura, uma vez que a distribuição da temperatura no *subpixel* será afetada.

Para a área em processo de combustão, nota-se que a área queimada no nadir também é maior, como demonstra a Figura 9, que compara a área queimada para as mesmas amostras presentes na Figura 8.

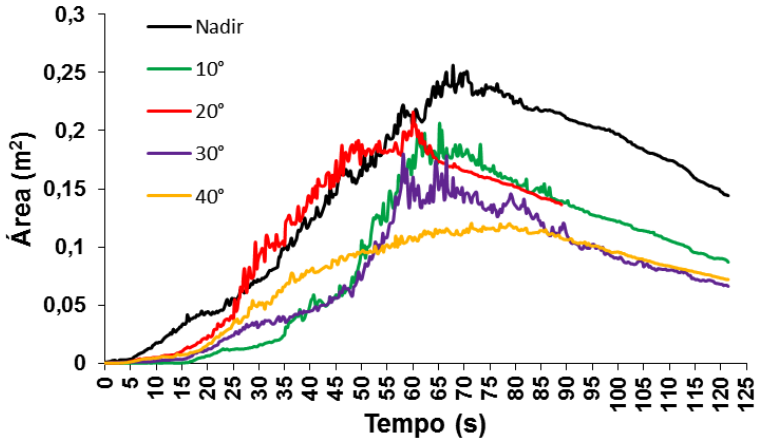

Figura 9: Área queimada para as amostras apresentadas na Figura 8.

Mantendo-se a área imageada, e a mesma sendo visualizada com ângulos diferentes, a área queimada será menor conforme o aumento do ângulo de visada, uma vez que a projeção do detector sobre a área em que está ocorrendo a queimada é maior. Contudo, em alguns casos a área queimada para uma mesma quantidade de biomassa foi maior em um ângulo mais oblíquo, como demonstrado na Figura 10.

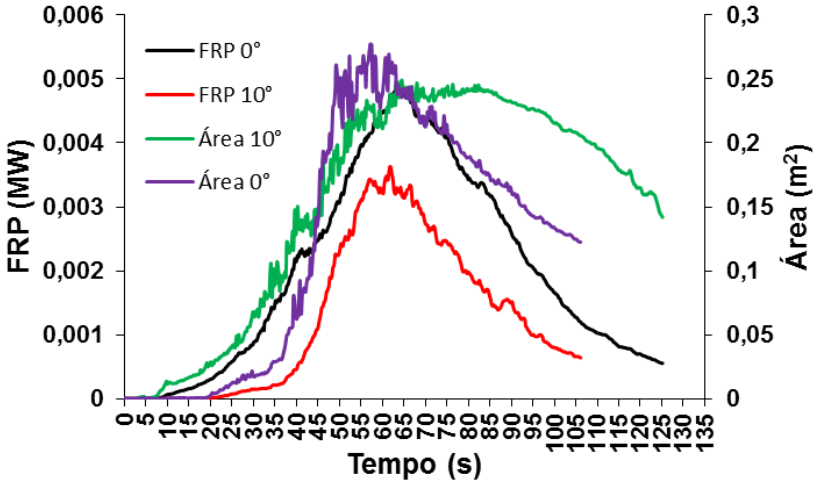

Figura 10: Estimativas da FRP e da área queimada para duas amostras, uma no nadir e outra com ângulo de visada de 10º.

Uma possível explicação para o ocorrido é o fato das chamas na amostra coletada com visada de 10 graus estarem altas, portanto essa chama pode ter sido projetada em uma área que não estava queimando, como ocorreu no experimento realizado por Paugam et al. (2013). Segundo Freeborn et al. (2008), o aumento do ângulo de visada pode causar a projeção das chamas sobre áreas em

que não estava ocorrendo a queimada, o que geralmente ocorre com maiores quantidades de biomassa. Ainda assim, percebe-se que a FRP no nadir é maior, já que nessa geometria de aquisição a temperatura é mais intensa por estar sendo vista na vertical, como discutido anteriormente.

Como discutido anteriormente para as estimativas da FRP *forward* e *backward*, para uma comparação mais profunda entre a FRP e a área queimada com diferentes ângulos de visada o ideal seria analisar uma amostra com mais de um sensor, pois vários fatores interferem na estimativa da FRP, e mesmo com a tentativa de controlar esses fatores dificilmente duas amostras apresentarão a mesma FRP ao longo do processo de combustão.

A diminuição das estimativas de acordo com o aumento do ângulo se reflete na FRE, pois os valores tendem a cair linearmente de acordo com o aumento do ângulo de visada, como no exemplo apresentado na Figura 11, que compara as estimativas da FRE média para as amostras de 150 gramas nos diferentes ângulos de visada analisados.

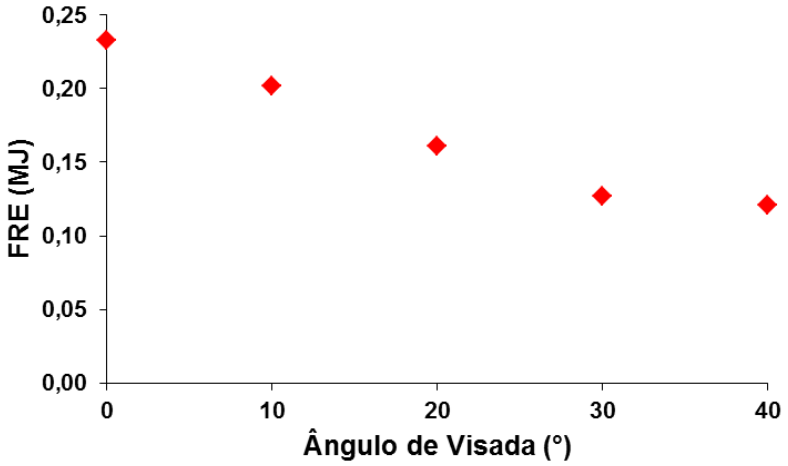

Figura 11: FRE média para as amostras de 150 gramas com diferentes ângulos de visada.

Com isso, a determinação do coeficiente de biomassa queimada para a cana-de-açúcar também considerou o ângulo de visada. O coeficiente apresentado na Equação 12 foi submetido ao teste estatístico t-Student e considerado significativo a 5%.

$$TBQ_{Cana} = (2,44.FRP) - (1,87.\cos\theta.FRP) \tag{12}$$

em que TBQ_{Cana} é a taxa de biomassa queimada para a cana-de-açúcar (kg.s^{-1}), *FRP* é a potência radiativa do fogo (MW) e θ é o ângulo de visada do sensor no momento da aquisição dos dados.

Deve-se ressaltar que para se chegar à Equação 12, multiplicou-se a biomassa de cada amostra pelo fator de combustão da palha da cana-de-açúcar, uma vez que a palha da cana-de-açúcar não é totalmente consumida pela combustão. O fator de combustão utilizado, ou seja, a fração de biomassa que é realmente queimada, foi 0,9, determinado por França et al. (2012) a partir de um experimento de combustão em pequena escala realizado para determinar os fatores de emissão da cana-de-açúcar.

Analisando os coeficientes de biomassa queimada encontrados em literatura, a taxa de biomassa queimada é invariável de acordo com a variação do ângulo de visada, o que não corresponde à

realidade, visto que, como mostrado anteriormente, a FRP tende a diminuir de acordo com o aumento do ângulo de visada. O coeficiente de biomassa queimada encontrado tem por objetivo corrigir a influência do ângulo na estimativa da FRP, já que essa diminuição da FRP causa pelo ângulo é considerada. No entanto, é necessário avaliá-lo com dados coletados em condições reais de queima a fim de testar sua real efetividade.

6. Conclusões

Os resultados encontrados no experimento de combustão em pequena escala permitiram determinar relação entre o ângulo de visada e a estimativa da FRP. Para o ângulo de visada, as estimativas da FRP diminuíram de acordo com o seu aumento, com as estimativas da FRP no nadir podendo chegar a atingir o dobro das estimativas com ângulo de visada de 40º para uma mesma quantidade de biomassa.

Como sugestão para trabalhos futuros, deve-se analisar a queima de uma amostra de biomassa com dois sensores posicionados com ângulos diferentes, pois a FRP pode variar muito de acordo com fatores como o ângulo de visada, o teor de umidade da amostra, o vento e a posição da queimada em relação ao sensor, portanto, dificilmente duas amostras de mesma biomassa e mesmo peso apresentarão FRP idêntica ao longo do processo de combustão.

Sempre que possível é indicado o controle dos fatores apresentados acima, principalmente o teor de umidade das amostras, sendo o ideal que todas apresentem o mesmo teor de umidade.

Ainda, para avaliar a efetividade do coeficiente de biomassa encontrado deve-se aplicá-lo a experimentos em campo, ou seja, estimar a FRP e a biomassa queimada a partir da queima de talhões de cana-de-açúcar em condições reais.

Por fim, espera-se no futuro empregar a metodologia que utiliza a FRP para estimar a quantidade de biomassa queimada e as emissões de gases do efeito estufa provenientes da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar para a região Centro-Sul do Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de mestrado e à UFSJ e EMBRAPA Meio Ambiente pela colaboração durante o experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andreae, M. A., e Merlet, P. “Emission of trace gases and aerosols from biomass burning.” *Global Biogeochemical Cycles* 4 (2009): 955-966. Acesso em 07 Outubro, 2014. doi: 2000GB001382. 0886-6236/01/2000GB001382$12.00.

Dozier, J. “A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution.” *Remote Sensing of Environment* 11(1981): 221-229. Acesso em 03 Outubro, 2014. doi: 0034-4257/81/030221 + 9502 50.

Eckman, Ted C., Roberts, Dar A., e Still, Christopher J. “Using multiple endmember spectral mixture analysis to retrieve subpixel fire properties from MODIS.” *Remote Sensing of Environment* 112 (2008): 3773-3783. Acesso em 29 Setembro, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2008.05.008.

Eckman, Ted C, Still, Christopher J, Roberts, Dar A., e Michaelsen, Joel C. “Variations in subpixel fire properties with season and land cover in Southern Africa.” *Earth Interactions* 4 (2010): 1-29. Acesso em 03 Outubro, 2014. doi: 10.1175/2010EI328.1.

França, Daniela de Azevedo, Longo, Karla Maria, Soares Neto, Turibio Gomes, Santos, José Carlos, Freitas, Saulo Ribeiro, Rudorff, Bernardo F. T., Cortez, Ely Vieira, Anselmo, Edson e Carvalho Junior, João Andrade. “Pre-harvest sugarcane burning: determination of emission factors through laboratory measurements.” *Atmosphere* 3 (2012): 164-180. Acesso em 08 Outubro, 2014. doi: 10.3390/atmos3010164.

Freeborn, Patrick H., Wooster, Martin J., Hao, Wei Min, Ryan, Cecily, A., Nordgren, Bryce L., Baker, Stephen P., e Ichoku, Charles. “Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires.” *Journal of Geophysical Research* 113 (2008): 1-17. Acesso em 05 Outubro, 2014. doi: 10.1029/2007JD008679.

Freitas, S. R., Longo, K. M., Silva Dias, M. A. F., Chatfield, R., Silva Dias, P., Artaxo, P., Andreae, M. O., Grell, G., Rodrigues, L. F., Fazenda, A., e Panetta, J. “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 (2007): 2843-2861. Acesso em 06 Outubro, 2014. doi: 10.5194/acp-9-2843-2009.

Giglio, L., Kendall, J., e Mack, R. “A multi-year active fire dataset for the tropics derived from the TRMM VIRS.” *International Journal of Remote Sensing* 24 (2003): 4505-4525. Acesso em 03 Outubro, 2014. doi: 10.1080/014311603100007028.

Giglio, L., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Collatz, G. J., e Kasibhatla, P. “Global estimation of burned area using MODIS active fire observations.” *Atmospheric Chemistry and Physics* 6 (2006): 957-974. Acesso em 01 Outubro, 2014. doi: 10.5194/acp-6-957-2006.

Hantson, Stijn, Padilla, Marc, Corti, Dante, e Chuvieco, Emilio. “Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence.” *Remote Sensing of Environment* 131 (2013): 152-159. Acesso em 03 Outubro, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2012.12.004.

Ichoku,Charles, Giglio, Louis, Wooster, Martin J., e Remer, Lorraine R. “Global characterization of biomass burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy.” *Remote Sensing of Environment* 112 (2008): 2950-2962. Acesso em 04 Outubro, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2008.02.009.

Ichoku, Charles, Kahn, Ralph, e Chin, Mian. “Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling.” *Atmospheric Research* 111 (2012): 1-28. Acesso em 10 Outubro, 2014. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.03.007.

Kaufman, Yoran J., Remer, Lorraine A., Ottmar, Roger D., Ward, Darold E., Li, Rong R., Kleidman, Richard, Fraser, Robert S., Flynn, Luke, McDougal, David, e Shelton, Gary. “*Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment*” in Global biomass burning, ed. Joel S. Levine, 685-696. Maryland: MIT Press, 1996.

Lauk, Christian, e Erb, Karl-Heinz. ". Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes." *Ecological Economics* 69 (2009): 301-309. Acesso em 06 Outubro, 2014. doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.07.003.

Paugam, Ronan, Wooster, Martin J., e Roberts, Gareth. "Use of thermal image data for airbornemapping of fire radiative power and energy and flame front rate of spread." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51 (2013): 3385-3390. Acesso em 04 Outubro, 2014. doi: 10.1109/TGRS.2012.2220368.

Pereira, Gabriel, Cardozo, Francielle da Silva, Moraes, Elisabete Caria, Ferreira, Nelson Jesus, Freitas, Saulo Ribeiro, Shimabukuro, Yosio Edemir, Breuning, Fábio Marcelo, e Viana, Denilson Ribeiro. "Determinação e modelagem da taxa de consumo de biomassa queimada." *Revista Brasileira de Meteorologia* 27 (2012): 13-22. Acesso em 08 Outubro, 2014.

Riggan, Philip J., Tissell, Robert G., Lockwood, Robert N., Brass, James A., e Pereira, João Antônio Raposo, Miranda, Heloisa S., Miranda, Antônio C., Campos, Tereza, Higgins, Robert. "Remote measurement of energy and carbon flux from wild-fires in Brazil." *Ecological Application* 03 (2004): 855-872. Acesso em 08 Outubro, 2014. doi: 10.1890/02-5162.

Roberts, G., Wooster, M. J., Perry, G. L.W., Drake, N., Rebelo, L. M., e Disposito, F. "Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery." *Geophysical Research* 110 (2005): 1-20. Acesso em 09 Outubro, 2014. doi: 10.1029/2005JD006018.

Schroeder, Wilfrid, Ellicott, Evan, Ichoku, Charles, Ellison, Luke, Dickinson, Matthew B., Ottmar, Roger D., Clements, Craig, Hall, Dianne, Ambrosia, Vincent, e Kremens, Robert. "Integrated active fire retrievals and biomass burning emissions using complementary near –coincident ground, airborne and spaceborne sensor data." *Remote Sensing of Environment* 140 (2014): 719-730. Acesso em 05 Outubro, 2014. doi: 10.1002/2014JD021993.

Seiler, Wolfgang, e Cutzen, Paul J. "Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning." *Climate Change* 02 (1980): 207-248. Acesso em 30 Setembro, 2014. doi: 10.1007%2FBF00137988.

Van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., e Arellano Junior, A. F. "Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004." *Atmospheric Chemistry and Physics* 06 (2006):3423-3441. Acesso em 01 Outubro, 2014. doi: 10.5194/acp-6-3423-2006.

Vermote, Eric, Ellicott, Evan, Dubovik, Oleg, Lapyonok, Tatyana, Chin, Mian, Giglio, Louis, Roberts, e Gareth J. "An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power." *Journal of Geophysical Research* 114 (2009): 1984-2012. Acesso em 09 Outubro, 2014. doi: 10.1029/2008JD011188.

Wooster, Martin J. "Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires." *Geophysical Research Letters* 29 (2002): 231-234. Acesso em 09 Outubro, 2014. doi: 10.1029/2002GL015487.

Wooster, M. J., Zhukov, B., e 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* 86 (2003): 83-107. Acesso em 03 Outubro, 2014. doi; 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.

Wooster, M. J. Roberts, G., Perry, G. L. W., e 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* 110 (2005): 83-107. Acesso em 03 Outubro, 2014. doi: 10.1029/2005JD006318.

Wooster, M. J., Freeborn, P. H., Archibald, S., Oppenheimer, C., Roberts, G. J., Smith, T. E. L., Govender, N., Burton, M., e Palumbo, I. ". Field determination of Biomass burning emission ratios and factors via open-path FTIR spectroscopy and fire radiative power assessment: head fire, backfire and residual smoldering combustion in African savannahs." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (2011): 11591-11615. Acesso em 04 Outubro, 2014. doi: 10.5194/acp-11-11591-2011.

Xu, W., Wooster, M. J., Roberts, G., e Freeborn, P. "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 (2010): 1876-1895.Acesso em 06 Outubro, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2010.03.012.

Recebido em Dezembro de 2014. Aceito em Março de 2015.