



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/02.13.13.40-TDI

## **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE VISADA E DO BACKGROUND NA ESTIMATIVA DA POTÊNCIA RADIATIVA DO FOGO**

Guilherme Augusto Verola Mataveli

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Drs. Elisabete Caria Moraes, e Gabriel Pereira, aprovada em 25 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3FNSAC8>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/02.13.13.40-TDI

## **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE VISADA E DO BACKGROUND NA ESTIMATIVA DA POTÊNCIA RADIATIVA DO FOGO**

Guilherme Augusto Verola Mataveli

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Drs. Elisabete Caria Moraes, e Gabriel Pereira, aprovada em 25 de fevereiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3FNSAC8>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Mataveli, Guilherme Augusto Verola.

M413a Análise da influência do ângulo de visada e do background na estimativa da potência radiativa do fogo / Guilherme Augusto Verola Mataveli. – São José dos Campos : INPE, 2014.  
xxii + 77 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/02.13.13.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Elisabete Caria Moraes, e Gabriel Pereira.

1. potência radiativa do fogo. 2. ângulo de visada. 3. biomassa queimada. 4. cana-de-açúcar. I.Título.

CDU 528.8:614.84

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Sensoriamento Remoto**

Dra. Elisabete Caria Moraes

Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Gabriel Pereira

Orientador(a) / UFSJ / Minas Gerais - MG

Dr. Kleber Trabaquini

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. André de Lima

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Ana Paula Contador Packer

Convidado(a) / EMBRAPA / São Paulo - SP

**Este trabalho foi aprovado por:**

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Guilherme Augusto Verola Matavelli**

**São José dos Campos, 25 de Fevereiro de 2014**



*“Para examinar a verdade, é necessário, uma vez na vida, colocar todas as coisas em dúvida o máximo possível”.*

*René Descartes*



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria primeiramente de agradecer a meus pais, Sebastião e Valda, e a minha irmã Lidiane pelo apoio incondicional durante toda a minha vida, ensinando-me princípios e valores que só se aprendem em família.

Também sou extremamente grato aos meus orientadores, Dra. Elisabete Caria Moraes e Dr. Gabriel Pereira, pela confiança depositada em mim, por todo o tempo gasto comigo durante esses dois anos que me fizeram crescer como profissional e como pessoa e por se mostrarem, acima de tudo, grandes amigos para todos os momentos.

Ainda, não posso deixar de agradecer aos amigos que fizeram parte da minha vida durante esses dois anos, e que com certeza levarei para sempre. Em especial, gostaria de agradecer aos amigos Bruno, Schultz, Renato, Fran, Suli, Carina, Frank, Bertani, Gabriel Oliveira, Yhasmin, Taíssa e Silvia.

Por fim, gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo durante esses dois anos.

A todos vocês o meu muito obrigado!



## RESUMO

As queimadas atingem grandes áreas em todo o planeta, constituindo-se em um agente modelador dos ecossistemas e contribuem para o acúmulo de gases traços e aerossóis na atmosfera. Em geral, os estudos relacionados às queimadas eram realizados a partir de experimentos e medições em campo, entretanto, esse tipo de abordagem é limitado. Nos últimos anos, com o avanço no sensoriamento remoto orbital e a possibilidade da aquisição de dados em nível global e de forma sistemática, o sensoriamento remoto tornou-se a principal fonte de dados para o estudo das queimadas. Como apenas identificar focos de queimada não é o suficiente para entender esse fenômeno por completo, surgiu a necessidade de se obter informações mais detalhadas sobre as queimadas, dentre elas estimar a quantidade de biomassa queimada, uma importante variável de entrada em modelos climatológicos e modelos de estimativas de emissão de gases traços e aerossóis. Um dos métodos mais utilizados atualmente para estimar a quantidade de biomassa queimada é derivado da Potência Radiativa do Fogo (FRP), sobre a premissa de 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. Contudo, são essenciais e devem ser compreendidos os fatores que introduzem erros na FRP, como o ângulo de visada e o *background*. Para avaliar a influência desses fatores na FRP foi realizado um experimento de combustão em pequena escala utilizando como biomassa a palha da cana-de-açúcar. Também foi determinado o coeficiente de biomassa queimada para a cana-de-açúcar a fim de estimar a biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo no período de 2008 a 2012 usando os produtos de fogo derivados do MODIS, do SEVIRI e do GOES *Imager*. As estimativas obtidas permitiram concluir que para amostras com a mesma quantidade de biomassa a FRP diminui de acordo com o aumento do ângulo de visada, e que o efeito de *background* pode elevar em até mais de 30% as estimativas obtidas. O SEVIRI foi o sensor mais eficiente para a detecção de focos de queimada em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, chegando a detectar 4,5 vezes mais focos que o MODIS e 6 vezes mais focos que o GOES *Imager*. Quanto às estimativas de biomassa queimada, percebe-se em 2012 uma queda significativa na biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, sendo a tendência nos anos seguintes que essa queda se acentue ainda mais devido à proximidade das metas determinadas pelo do Protocolo Etanol Verde.



## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VIEWING ANGLE AND BACKGROUND IN FIRE RADIATIVE POWER ESTIMATE**

### **ABSTRACT**

Fires affect large areas around the world, acting as a modeler of ecosystems and contributing to the accumulation of trace gases and aerosols in the atmosphere. Studies related to fires were initially conducted from field measurements; however, this approach is limited. Over the last years, with the advancement in remote sensing, providing the possibility of acquiring data at global scale systematically, remote sensing has become the main source of data for studying fires. However, the need of understanding this phenomenon completely resulted in obtaining more detailed information about fires, among them the estimate of the amount of burned biomass, an important input variable in climatological and emissions estimates models. One of the most frequently used methods nowadays to estimate the amount of burned biomass is derived from Fire Radiative Power (FRP) on the assumption that the amount of energy emitted as electromagnetic radiation during the combustion process could be directly related to the amount of burned biomass. However, like any estimate obtained with remote sensing, it should be understand the factors that introduce errors in FRP, such as viewing angle and background. To determine the influence of these factors in FRP, a small scale experiment was conducted using sugarcane straw as biomass; also was estimated the burned biomass coefficient for sugarcane and it was applied to estimate burned biomass by sugarcane pre-harvest burning in São Paulo State from 2008 to 2012 using active fire products derived from MODIS, SEVIRI and GOES Imager. The estimates obtained showed that for biomass samples with same weight FRP decreases with increased angle, and the background can increase estimates in more than 30%. SEVIRI was the most effective sensor for detecting fires in sugarcane areas, detecting 4.5 times more fires than MODIS and 6 times more fires than GOES Imager. Regarding burned biomass estimates, it was noticed a significant decrease in biomass burned from sugarcane pre-harvest burning in 2012, and the tendency is that in the following years this decrease elevates, due to the proximity of the goals established by Green Ethanol Protocol.



## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 3.1 - Localização da área de estudo, o Estado de São Paulo. Mosaico de imagens TM/Landsat-5, composição colorida R5G4B3.....	14
Figura 3.2 - Tipo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nos anos de 2006 (a), 2007 (b), 2008 (c), 2009 (d), 2010 (e) 2011 (f) e 2012 (g).....	16
Figura 3.3 - Área percentual (Figura 3.3(a)) e total (Figura 3.3(b)) de cana crua e cana queima no Estado de São Paulo entre os anos de 2006 e 2012. ....	17
Figura 3.4 - Localização das RAs do Estado de São Paulo.....	18
Figura 4.1 - Etapas realizadas para a execução do experimento de combustão. A palha da cana-de-açúcar (4.1 (a)) foi separada e pesada (4.1(b)) de acordo com a Tabela 4.1. A Figura 4.1(c) mostra a câmera termal posicionada com ângulo de visada de 20° durante a queima de uma amostra e a Figura 4.1(d) apresenta uma amostra de palha de açúcar de 200g durante o processo de combustão. ....	24
Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia dividido em dois blocos principais. O Bloco A corresponde ao processamento dos resultados do experimento de combustão em pequena escala e o Bloco B corresponde ao processamento dos produtos de fogo. ....	26
Figura 4.3 - <i>Frame</i> gerado pela câmera termal sobreposto pela representação dos <i>pixels</i> contidos no <i>frame</i> . <i>Pixels</i> cuja temperatura era inferior a 80° C (cor preta) foram desconsiderados na estimativa da <i>FRPpixel</i> . ....	28
Figura 4.4 - Exemplo de estimativa da FRE para uma amostra. $t_1$ e $t_{10}$ representam, respectivamente, o início e o final do processo de combustão. A FRE foi estimada a partir da integração FRP de cada <i>frame</i> , como demonstrado na Equação 4.3. ....	29
Figura 4.5 - A Figura 4.5(a) exemplifica a combustão de uma amostra em 1quadrante; nota-se os 4 quadrantes pela marcação branca na plataforma. As Figuras 4.5(b), 4.5(c), 4.5(d) e 4.5(e) representam, respectivamente, um <i>frame</i> com a biomassa preenchendo 1, 2, 3 e 4 quadrantes. ....	30
Figura 4.6 – Exemplo da FRP estimada para uma mesma amostra com e sem o <i>background</i> presente na estimativa.....	31
Figura 4.7 - Fluxograma adotado para o processamento dos produtos de fogo ativo. ...	33
Figura 4.8 - Representação das estimativas de biomassa queimada para os focos de queimada detectados (círculos vermelhos) e agrupamento das estimativas (círculo preto) em uma grade regular (linhas pretas). Imagem TM/Landsat-5, órbita-ponto 220/075 de 19/04/2011. Composição colorida RGB543.....	39
Figura 5.1 - Estimativa da FRP no nadir ao longo do processo de combustão para uma amostra de 100 gramas de palha de cana-de-açúcar.....	41

Figura 5.2 - Estimativas de FRP para amostras de diferentes pesos em uma mesma ótica (câmera termal posicionada no nadir). .....	43
Figura 5.3 - Estimativa da FRP para duas amostras de 175 gramas, uma com influência do vento (velocidade de 3 Km/h) e outra amostra sem vento durante o processo de combustão.....	44
Figura 5.4 - Estimativa da FRP no nadir para duas amostras de 150 gramas, sendo uma amostra seca e uma amostra úmida. ....	45
Figura 5.5 - Estimativa da FRP com ângulo de visada de 40° para duas amostras, uma amostra na posição <i>forward</i> e a outra amostra na posição <i>backward</i> . ....	46
Figura 5.6 - Estimativas da FRE para a análise da posição do sensor em relação às amostras submetidas ao processo de combustão. ....	47
Figura 5.7 - Estimativas da FRP para amostras de 100 gramas com diferentes ângulos de visada. ....	48
Figura 5.8 - Área queimada para as amostras de 100 gramas com diferentes ângulos de visada. ....	49
Figura 5.9 - Estimativas da FRP e da área queimada para duas amostras, sendo que na amostra de 10 graus. ....	50
Figura 5.10 - Valores da FRE para as amostras de 150 gramas com diferentes ângulos de visada. Os valores considerados <i>outliers</i> foram removidos da dispersão.....	51
Figura 5.11 - Comparação da taxa de biomassa queimada estimada para os dois coeficientes encontrados para diferentes ângulos de visada.....	52
Figura 5.12 – Comparação da FRP estimada para 4 amostras diferentes preenchendo, respectivamente, 25% (Figura 5.12 (a)), 50% (Figura 5.12 (b)), 75% (Figura 5.12 (c)) e 100% (Figura 5.12 (d)) da área composta pelos 4 quadrantes.....	53
Figura 5.13 – Número total de <i>pixels</i> considerados como <i>background</i> para as amostras apresentadas das na Figura 5.12. ....	55
Figura 5.14 - Total anual de focos de queimada detectados em áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo de 2008 a 2012.....	57
Figura 5.15 - Total anual de focos de queimada detectados para cada sensor analisado em áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo de 2008 a 2012 .....	59
Figura 5.16 – Total anual de focos de queimada detectados em áreas de cana-de-açúcar nas RAs do Estado de São Paulo entre 2008 e 2012. ....	60
Figura 5.17 – Estimativas de biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em 2008 (a), 2009 (b), 2010 (c), 2011 (d) e 2012 (e). (Continua)	62
Figura 5.17 – Conclusão.....	63
Figura 5.18 - Biomassa queimada anual em toneladas para as RAs do Estado de São Paulo nos anos de 2008 a 2012.....	64
Figura 5.19 - Total anual de biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo de 2008 a 2012.....	65

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 4.1 - Peso de cada amostra, número de amostras para cada ângulo de visada e total de amostras e pesos utilizados no experimento de combustão me pequena escala.	24
Tabela 5.1 - Estimativa da FRE para as amostras apresentadas na Figura 5.2.....	43
Tabela 5.2 - Incremento na FRE ocasionado pelo <i>background</i> para as amostras analisadas com e sem o <i>background</i> . .....	56



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CCD	<i>Couple Charged Device</i>
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GOES Imager	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite Imager</i>
HDF4	<i>Hierarchical Data Format versão 4</i>
HDF5	<i>Hierarchical Data Format versão 5</i>
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IFOV	Campo de visada instantâneo
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVM	Infravermelho Médio
LAADS Web	<i>Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System</i>
LAS SAF	<i>Land Surface Analysis Satellite Applications Facility</i>
LISS-III	<i>Linear Imaging Self-Scanner</i>
<i>METEOrological SATellite</i>	METEOSAT
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
RAs	Regiões Administrativas

REM	Radiação eletromagnética
SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager</i>
SMA	Secretaria de Meio Ambiente
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UFSJ	Universidade Federal de São João del Rei
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
WFABBA	<i>Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área queimada ( $\text{km}^2$ )
$a$	Constante de calibração baseada na resposta espectral de cada sensor ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}.\text{K}^{-4}$ )
$A_f$	Área do fogo ( $\text{m}^2$ )
$A_n$	Área fracional da $n$ ésima componente termal ( $\text{m}^2$ )
$A_{real}$	Área real do <i>pixel</i> ( $\text{km}^2$ )
$A_{pixel}$	Tamanho do <i>pixel</i> ( $\text{km}^2$ )
$B$	Biomassa disponível para queima ( $\text{kg.km}^{-2}$ )
$BQ$	Quantidade de biomassa queimada
$BQ_{(lon,lat)}$	Biomassa queimada para cada célula da grade regular (kg)
$C_1$	Constante utilizada para estimar $M_\lambda$ ( $3,74.10^8 \text{ W.m}^{-2}$ )
$C_2$	Constante utilizada para estimar $M_\lambda$ ( $1,44 \times 10^4 \mu\text{m.K}$ )
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{FRE}$	Energia Radiativa do Fogo (MJ)
$\text{FRP}$	Potência Radiativa do Fogo (MW)
$\text{FRP}_{corrigida}$	Potência Radiativa do Fogo corrigida para o efeito <i>bow-tie</i> (MW)
$\text{FRP}_{frame}$	Potência Radiativa do Fogo de cada <i>frame</i> (MW)
$\text{FRP}_{MODIS}$	Potência Radiativa do Fogo estimada a partir do MODIS (MW)
$\text{FRP}_n$	Potência Radiativa do Fogo no <i>frame</i> $n$ (MW)
$\text{FRP}_{n+1}$	Potência Radiativa do Fogo no <i>frame</i> $n+1$ (MW)
$\text{FRP}_{pixel}$	Potência Radiativa do Fogo para cada <i>pixel</i> (MW)
$L$	Radiância espectral ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$ )
$L_b$	Radiância espectral do <i>background</i>

$M_\lambda$	Radiância espectral emitida ( $\text{W.m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )
$N$	Número da coluna do <i>pixel</i>
$r$	Soma de $R_e$ e a altitude do sensor
$R_e$	Raio da Terra (6378,13 km)
$S$	Razão entre a resolução espacial do <i>pixel</i> no nadir e a altitude do senso
$T$	Temperatura (K)
$T_b$	Temperatura do <i>background</i> (K).
$T_f$	Temperatura do fogo (K)
$T_n$	Temperatura da enésima componente (K)
$TBQ$	Taxa de biomassa queimada ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$TBQ_{ag}$	Taxa de biomassa queimada agrupada para cada célula da grade regular ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$TBQ_{cana}$	Taxa de biomassa queimada para a cana-de-açúcar ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$\alpha$	Fator de combustão
$\theta$	Ângulo de visada
$\varepsilon$	Emissividade
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{J.s}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )
$\Delta t$	intervalo de tempo entre as estimativas (s)
$\lambda$	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )
$\lambda_f$	Comprimento de onda inicial ( $\mu\text{m}$ )
$\lambda_i$	Comprimento de onda inicial ( $\mu\text{m}$ )

## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Problema.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo Geral .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
2.1 A queima de biomassa.....	7
2.2 Potência Radiativa do Fogo (FRP) e métodos para sua estimativa .....	8
2.3 Coeficientes para estimar a taxa de biomassa queimada a partir da FRP.....	11
3 ÁREA DE ESTUDO .....	13
3.1 O Estado de São Paulo .....	13
3.2 Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo .....	14
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
4.1 Principais sensores orbitais utilizados para estimar a FRP.....	19
4.1.1 MODIS/Terra e Aqua .....	19
4.1.2 SEVIRI/METEOSAT .....	20
4.1.3 GOES <i>Imager</i> /GOES.....	21
4.2 Dados Complementares.....	21
4.2.1 Projeto Canasat.....	21
4.3 Experimento de combustão em pequena escala .....	22
4.3.1 Câmera termal.....	22
4.4 Metodologia.....	26
4.4.1 Fluxograma da metodologia .....	26
4.4.2 Estimativa da FRP e da FRE a partir do experimento de combustão em pequena escala .....	27
4.4.3 Análise da influência do <i>background</i> na estimativa da FRP .....	29
4.4.4 Determinação do coeficiente de biomassa queimada .....	32

4.4.5	Processamento dos produtos de fogo ativo .....	32
4.4.5.1	Processamento MOD14 e MYD 14.....	34
4.4.5.2	Processamento FRP-PIXEL .....	35
4.4.5.3	Processamento WFABBA .....	36
4.4.5.4	Determinação da taxa de biomassa queimada e estimativa da biomassa queimada .	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
5.1.	Experimento de combustão em pequena escala .....	41
5.2.	Distribuição dos focos de queimada e estimativa de biomassa queimada para o Estado de São Paulo .....	56
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

# 1 INTRODUÇÃO

A queima de biomassa é um fenômeno que ocorre na maioria das partes vegetadas da superfície terrestre, seja através de queimadas naturais ou de origem antrópica (ANDREAE, 1991; ICHOKU et al., 2012) e contribui 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). Em uma escala global, cerca de 90% das queimadas são de origem antrópica, com os 10% restantes relacionados a acidentes ou causas naturais, como raios (ANDREAE; MERLET, 2001), e estima-se que entre 3547 e 3938 teragramas (Tg) de matéria seca são consumidas anualmente por queimadas antrópicas em todo o globo (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). Nos últimos anos, com o avanço 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), tornando 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).

## 1.1 Considerações Iniciais

As queimadas atingem grandes áreas em todo o planeta e possuem um importante papel no sistema terrestre, através da emissão de gases traços e aerossóis para a atmosfera e por serem um agente modelador dos ecossistemas e fonte de mudanças no uso e cobertura da terra (ECKMAN et al., 2008; ICHOKU et al., 2008).

As informações obtidas por meio de sensoriamento remoto foram utilizadas durante muito tempo apenas para identificar e monitorar a ocorrência dos focos de queimadas e não apresentavam estimativas eficazes da quantidade de biomassa queimada

(WOOSTER et al., 2003). Apesar dos estudos voltados para estimar a quantidade de biomassa queimada através de sensoriamento remoto terem crescido desde a última década, ainda existem incertezas tanto nos dados de entrada quanto na aplicação das metodologias utilizadas, o que pode gerar um erro de até 50% nos valores estimados (VERMOTE et al., 2009).

Vários métodos foram desenvolvidos ao longo do tempo para estimar a biomassa queimada (FREEBORN et al., 2008). Tradicionalmente, a quantidade de biomassa queimada é estimada a partir da Equação 1.1 (SEILER; CRUTZEN, 1980):

$$BQ = A.B.\alpha \quad (1.1)$$

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

A dificuldade em estimar a biomassa queimada a partir da Equação 1.1 reside 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 das incertezas presentes nas estimativas de  $A$  e  $B$  (VAN DER WERF et al., 2006; PEREIRA et al., 2012), o que gerou o interesse em métodos alternativos para estimar a biomassa queimada (ANDREAE; MERLET, 2001).

Um dos métodos mais utilizados atualmente para estimar o total de biomassa queimada é derivado da energia radiativa do fogo (FRE, em MJ) (ROBERTS et al., 2005; WOOSTER et al., 2005; FREEBORN et al., 2008; VERMOTE et al., 2009; PEREIRA et al., 2012), que é definida como a energia emitida pelo fogo como radiação eletromagnética (REM) durante o ciclo de vida da queimada (WOOSTER et al., 2003).

## 1.2 Problema

Para estimar a biomassa queimada com o uso da FRE deve-se considerar que a FRE não é estimada diretamente por meio de sensores orbitais devido à limitação temporal da aquisição de dados de sensoriamento remoto, sendo a potência radiativa do fogo (FRP,

em MW) a estimativa adquirida, visto que essa é uma grandeza instantânea. A FRP pode ser definida como a taxa na qual a energia, na forma de radiação eletromagnética, é emitida pelo fogo (WOOSTER et al., 2003) e, se estimada sobre a mesma queimada com uma frequência temporal adequada ou até mesmo simulada pode-se gerar a FRE a partir da integração das estimativas de FRP. Portanto, ao se estimar a biomassa queimada a partir da FRP, o que se obtém é a taxa de consumo de biomassa ( $TBQ$ , em  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ), enquanto que as estimativas a partir da FRE permitem estimar a quantidade total de biomassa queimada.

Atualmente, estão disponíveis de forma gratuita produtos de fogo derivados de sensores a bordo de satélites de órbita polar, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e de sensores a bordo de satélites de órbita geostacionária, como o *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) e o *Geostationary Operational Environmental Satellite Imager* (GOES Imager) que trazem, entre outras estimativas, a FRP associada aos focos de queimada detectados. Contudo, como toda estimativa obtida por sensoriamento remoto orbital, 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 a determinação da área de fogo ativo em um *pixel* e o ângulo de visada do sensor em relação à área em queima.

Segundo Pereira et al. (2012), um dos grandes desafios em estudos relacionados à estimativa de biomassa queimada a partir da FRP é determinar a área de fogo ativo. Essa dificuldade reside no fato de que nas estimativas feitas com o uso de sensoriamento remoto a radiância correspondente a um *pixel* compreende 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*.

Outro fator que introduz erros na estimativa FRP é o ângulo de visada do sensor orbital. 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 pode ser comprometida, o que introduz erros nas estimativas de FRP. Paugam et al. (2013) realizaram um experimento de combustão em pequena escala e analisaram a FRE estimada a partir da integração temporal da FRP para quantidades controladas de biomassa expostas à combustão com duas câmeras termais idênticas e intercalibradas, uma posicionada no nadir e a outra com um ângulo de visada de aproximadamente 40 graus ( $^{\circ}$ ), e encontraram uma diferença de até 22% entre as estimativas dos dois sensores para uma mesma amostra de biomassa.

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 uma estimativa mais precisa da FRP. Neste contexto, a análise dos erros que o *background* e o ângulo de visada introduzem na estimativa da FRP é de fundamental importância.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar os erros introduzidos pelo *background* e pelo ângulo de visada na estimativa da FRP a partir de um experimento de combustão em pequena escala utilizando como biomassa a palha da cana-de-açúcar.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

(a) Obter o coeficiente que relaciona a FRP e a *TBQ* para a cana-de-açúcar a partir de um experimento de combustão em pequena escala.

(b) Estimar a quantidade de biomassa queimada consumida pela queimada pré-colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre 2008 e 2012 utilizando a metodologia baseada na FRP e os resultados obtidos no experimento de combustão em pequena escala.

(c) Avaliar a distribuição espacial e temporal dos focos de queimada detectados pelos sensores MODIS, SEVIRI e GOES *Imager* que ocorreram em áreas que utilizaram a queimada pré-colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre 2008 e 2012.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Com o avanço do sensoriamento remoto orbital, os sensores consolidaram-se como a principal fonte de dados para o estudo das queimadas, sendo a FRP uma das estimativas presentes nos produtos de fogo. Nesse capítulo, serão realizadas algumas considerações sobre a queima de biomassa, a FRP e alguns dos métodos para sua estimativa, assim como observações sobre a estimativa de biomassa queimada a partir da FRP.

### **2.1 A queima de biomassa**

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 como o uso de lenha para cozinhar ou fazer carvão (ICHOKU et al., 2012). Estima-se que o total anual mundial de área queimada esteja entre 2,97 e 3,74 milhões de Km<sup>2</sup> (GIGLIO et al., 2006), sendo que dois terços deste total ocorrem, na sua maioria, em regiões de savana (LAUK; ERB, 2009).

Na região tropical, a atividade humana é a causa mais comum da incidência de queima de biomassa, pois o fogo é utilizado na agropecuária, principalmente, com a finalidade de abrir novas áreas destinadas à atividade agropecuária, limpeza de áreas e rotação de culturas agrícolas, controle de pragas, remoção de vegetação seca e restos do cultivo e aumento e manutenção de pastagens (LAUK; ERB, 2009).

No Brasil, a queima de biomassa está relacionada principalmente às áreas de expansão agropecuária, como o arco do desmatamento (Bioma Amazônia) e a porção Leste do Nordeste (Bioma Cerrado), e áreas de manejo de pastagem para a criação de gado. Geralmente, as queimadas ocorrem na estação seca, 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 de expansão agropecuária e manejo de pastagens, a queima da palhada da cana-de-açúcar para a colheita desta cultura na Região Centro-Sul contribui ativamente para a queima de biomassa em escala nacional (FRANÇA et al., 2013), também merecendo destaque a queimada pré-colheita na Região Nordeste. 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). Já na Região Nordeste, existe uma maior dificuldade para se implantar a colheita mecânica, devido principalmente ao relevo, ao tamanho das propriedades e questões sociais, o que faz com que não se determine um prazo para o fim da queimada pré-colheita na Região Nordeste em um futuro próximo.

## **2.2 Potência Radiativa do Fogo (FRP) e métodos para sua estimativa**

O sensoriamento remoto é utilizado há muito tempo para fornecer dados sobre a localização e a quantidade dos focos de queimada (WOOSTER et al., 2005), no entanto, apenas identificar focos de queimada não é o suficiente para entender esse fenômeno por completo.

Considerando a necessidade de obter mais informações relacionadas às queimadas, Kaufman et al. (1996) introduziram o conceito da FRP, propondo 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. A partir disso, vários estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de estimar a quantidade de biomassa queimada e as emissões provenientes das queimadas com o uso da FRP (p. ex. ROBERTS et al., 2005; FREEBORN et al., 2008; PEREIRA et al., 2009; VERMOTE et al., 2009; KAISER et al., 2012)

A FRP pode ser estimada ao se conhecer a distribuição da temperatura no interior do *pixel*, como demonstrado na Equação 2.1 (KAUFMAN et al., 1996):

$$FRP = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (2.1)$$

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

A dificuldade em estimar a FRP a partir da Equação 2.1 refere-se à determinação da área das  $n$  componentes com anomalia térmica dentro de cada *pixel*, assim como a estimativa da temperatura de cada componente, já que 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 proposta por Wooster et al. (2003).

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 2.2 e 2.3 resolvidas em função da temperatura e da área do *subpixel*.

$$L_{4\mu\text{m}} = A_f \cdot B(\lambda_{4\mu\text{m}}, T_f) + (1 - A_f) \cdot B(\lambda_{4\mu\text{m}}, T_b) \quad (2.2)$$

$$L_{11\mu\text{m}} = A_f \cdot B(\lambda_{11\mu\text{m}}, T_f) + (1 - A_f) \cdot B(\lambda_{11\mu\text{m}}, T_b) \quad (2.3)$$

em que  $L$  representa a radiância espectral ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ) 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 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 2.1 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 2.4:

$$FRP = 4,3 \cdot 10^{-19} \cdot (T_{f4\mu\text{m}}^8 - T_{b4\mu\text{m}}^8) \cdot A_{real} \quad (2.4)$$

em que FRP é a potência radiativa do fogo ( $\text{MW}$  ou  $\text{MJ}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $T_f$  é a temperatura de brilho do *pixel* com anomalia térmica em  $4\mu\text{m}$  (K),  $T_b$  é a temperatura do *background* em  $4\mu\text{m}$  (K) e  $A_{real}$  é a área real do *pixel* ( $\text{km}^2$ ).

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

derivado do SEVIRI, a FRP é estimada empregando a radiância espectral na região do IVM, como apresentado na Equação 2.5:

$$FRP = \frac{A_{pixel}}{a} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \int_{\lambda_f}^{\lambda_i} B(\lambda, T) d\lambda - L_b \quad (2.5)$$

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).

### 2.3 Coeficientes para estimar a taxa de biomassa queimada a partir da FRP

Wooster (2002) testou as relações entre a FRP e a *TBQ* em um experimento de combustão em pequena escala, chegando à conclusão que existia de uma relação linear entre as variáveis. A partir disso, Wooster et al. (2005), Freeborn et al. (2008) e Pereira et al (2012) realizaram experimentos de combustão em pequena escala a fim de estimar essa relação a partir da queima controlada de quantidades conhecidas de biomassa.

A análise da relação entre a FRP e a *TBQ* originou as Equações 2.6, 2.7 e 2.8, respectivamente:

$$TBQ = 0,368.FRP \quad (2.6)$$

$$TBQ = 0,453.FRP \quad (2.7)$$

$$TBQ = 0,949.FRP \quad (2.8)$$

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

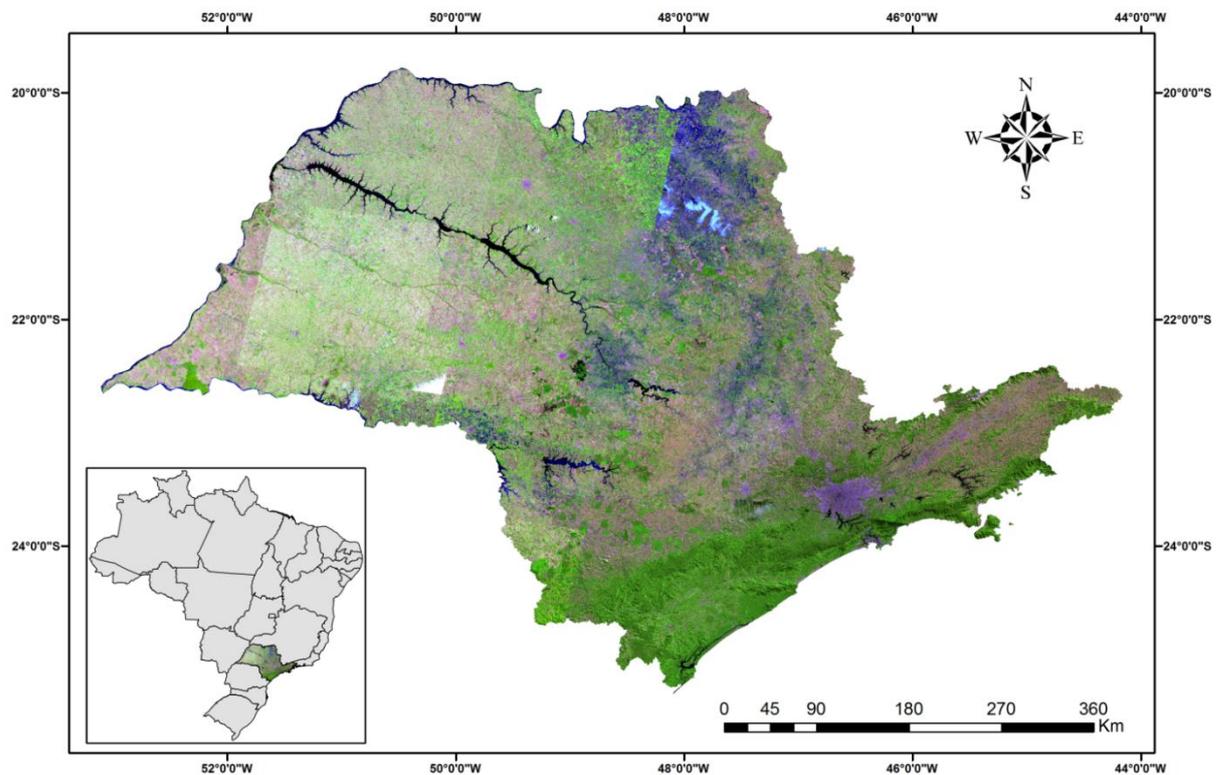
Cabe ressaltar que as espécies vegetais utilizadas para se chegar às Equações 2.6, 2.7 e 2.8 eram distintas e encontravam-se em diferentes condições de umidade, sendo os coeficientes apresentados acima específicos para espécies vegetais da Savana Africana (WOOSTER et al., 2005), para espécies vegetais 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.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, sendo que a prática da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar vêm diminuindo consideravelmente nos últimos anos, mas ainda é utilizada. Porém, espera-se que os prazos determinados pelo Protocolo Etanol Verde sejam cumpridos, com o fim das queimadas em 2014 para áreas mecanizáveis e em 2017 para áreas não mecanizáveis. Nesse capítulo será apresentada a justificativa para a escolha da área de estudo e a descrição da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

#### 3.1 O Estado de São Paulo

A área de estudo escolhida para aplicar os resultados do experimento de combustão em pequena escala foi o Estado de São Paulo (**Figura 3.1**), mais especificamente as áreas de cultivo de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, sendo que essa escolha deve-se ao fato do uso da queimada para a colheita da cana-de-açúcar, que vêm diminuindo consideravelmente desde 2006 (INPE, 2013). Considera-se ainda que o Protocolo Etanol Verde possa servir de exemplo para outros Estados, sendo, portanto, necessário compreender os impactos de sua adoção sobre a redução da queima de biomassa.



**Figura 3.1** - Localização da área de estudo, o Estado de São Paulo. Mosaico de imagens TM/Landsat-5, composição colorida R5G4B3.

### 3.2 Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

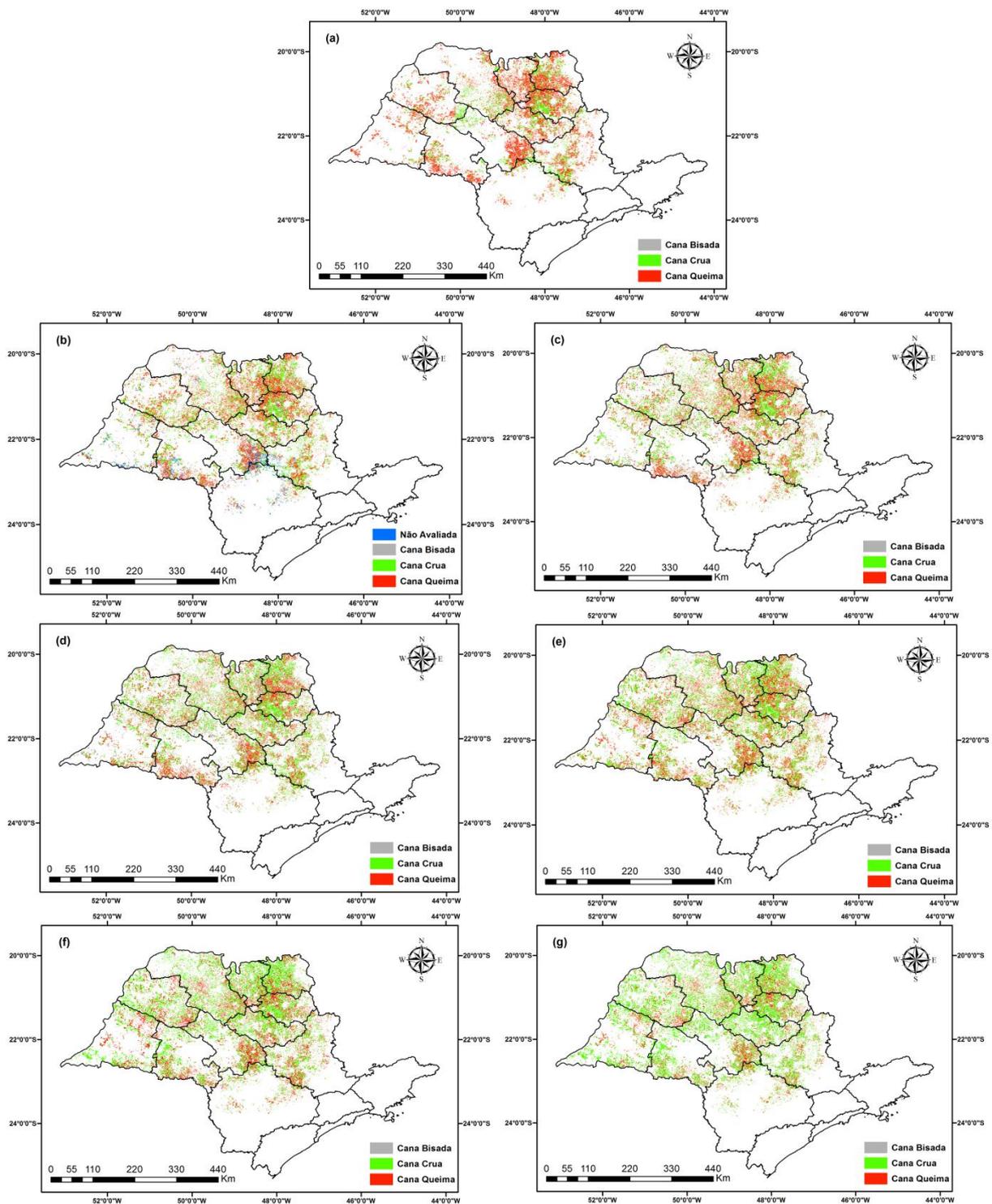
O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agrícolas, sendo o maior produtor de cana-de-açúcar e maior exportador de açúcar e álcool do mundo (AGUIAR et al., 2007). O Estado de São Paulo é o principal produtor nacional e somente na safra 2012 foi responsável por uma área cultivada de mais de 5,5 milhões de hectares de cana-de-açúcar (INPE, 2013).

Devido ao interesse em reduzir a dependência de combustíveis fósseis e à preocupação ambiental global, o uso do etanol está assumindo proporções mundiais, o que estimula a expansão do cultivo da cana-de-açúcar (AGUIAR et al., 2011). A crescente demanda de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, especialmente depois do ano de 2003 com a popularização dos carros bicombustíveis no Brasil, causou uma rápida expansão dessa cultura ao longo da última década (RUDORFF et al., 2010).

Durante a colheita da cana-de-açúcar, é comum utilizar a queima da palhada para facilitar a colheita. A prática das queimadas na agricultura ocasiona impactos sobre o solo, como aumento a susceptibilidade à erosão (SANTOS et al., 1992); sobre o clima e a atmosfera, uma vez que os gases traços e os aerossóis liberados pela queima de biomassa interagem com a radiação eletromagnética e ocasionam a absorção e espalhamento da mesma provocando alterações significativas no balanço de radiação e nos fluxos de calor latente e sensível (KAUFMAN et al., 1990); e sobre a saúde, principalmente com o aumento da incidência de casos de doenças respiratórias, como a asma (RIBEIRO, 2008).

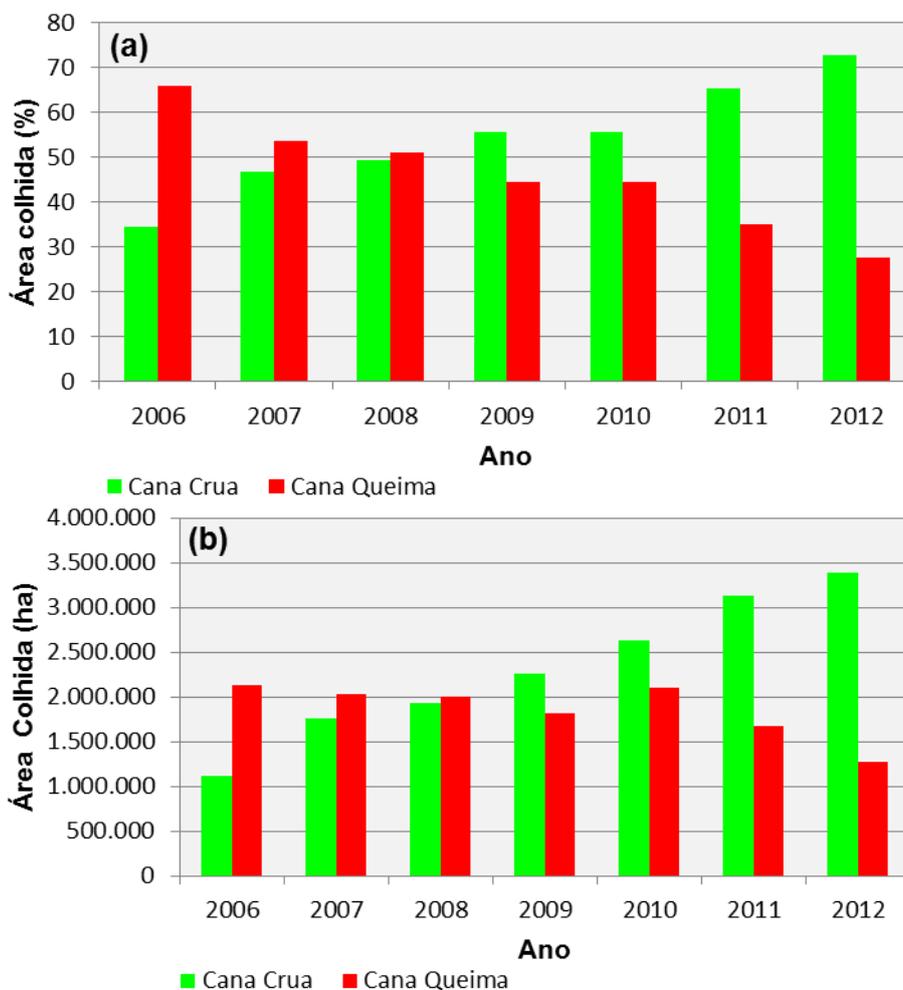
Visando acabar com a prática da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, devido aos seus impactos sobre o meio ambiente e a saúde, em 2002 foi aprovada a Lei Estadual 11.241, que estipulou um cronograma para a eliminação da queima nos canaviais, com prazo final em 2021 para áreas mecanizáveis (declividade  $\leq 12\%$ ) e em 2031 para áreas não mecanizáveis (declividade  $> 12\%$ ). Com o intuito de acelerar o processo de diminuição dessa queima, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) firmaram em agosto de 2007 um protocolo de intenções, denominado Protocolo Etanol Verde, em que a prática da queima da palha da cana-de-açúcar deve ser gradativamente reduzida até sua completa eliminação em 2017 para áreas não mecanizáveis e até 2014 em áreas mecanizáveis (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DE SÃO PAULO, 2013).

A **Figura 3.2** apresenta o mapa temático do tipo de colheita das áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo entre 2006 e 2012 realizado pelo projeto Canasat (INPE, 2013). A classe cana crua refere-se à colheita mecânica, a classe cana queima representa a colheita com o uso da queima da palhada, a classe cana bisada são as áreas em que a cana-de-açúcar não foi colhida ao fim da safra e a classe área não avaliada refere-se às áreas onde não foi possível determinar o tipo de colheita devido à presença de nuvens. Nesse período, a área total colhida de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo passou de 3.242.110 hectares para 4.658.316 hectares, um aumento de aproximadamente 43% (INPE, 2013).



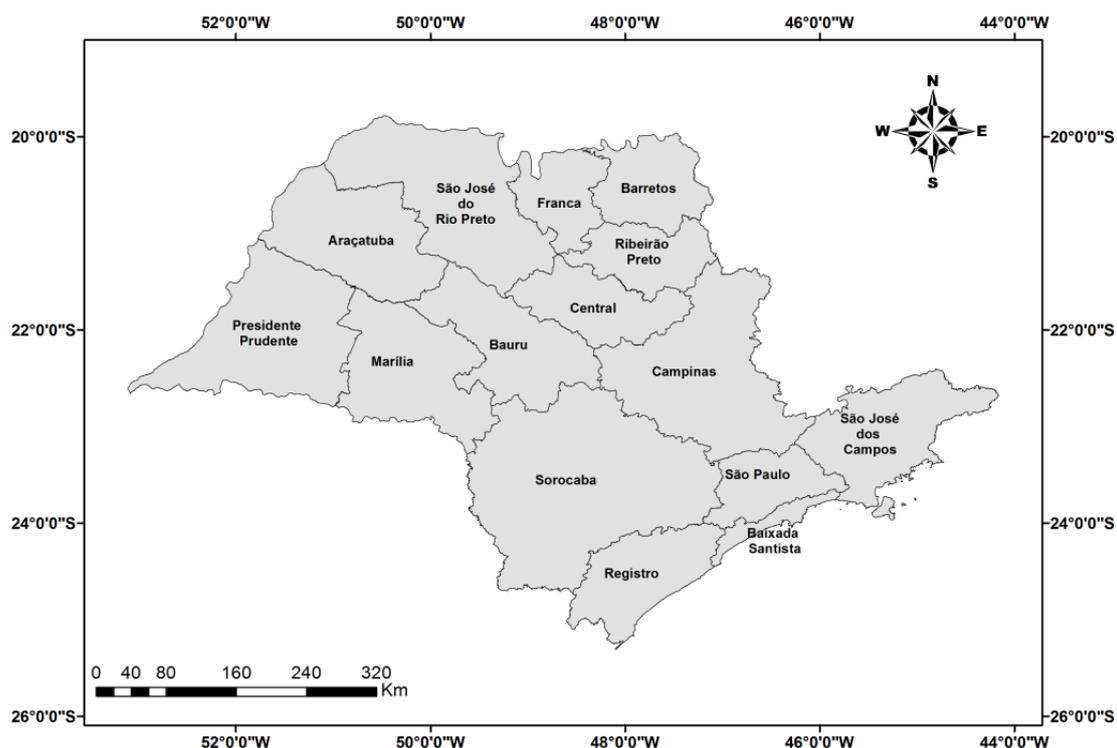
**Figura 3.2** - Tipo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nos anos de 2006 (a), 2007 (b), 2008 (c), 2009 (d), 2010 (e) 2011 (f) e 2012 (g).  
 Fonte: Projeto Canasat (INPE, 2013).

Conforme a evidenciado na **Figura 3.3(a)**, a porcentagem de área colhida com queima vem diminuindo gradativamente desde 2006, ano em que esse tipo de informação tornou-se disponível para o Estado de São Paulo a partir do mapeamento realizado pelo projeto Canasat (INPE, 2013). Em 2006, 65,8% da colheita em São Paulo utilizou a queimada, havendo diminuição ao longo dos anos, alcançando 27,4% em 2012. Apesar da redução, nota-se para 2010 um aumento de pouco mais de 16% em área colhida com a queima da palhada (**Figura 3.3(b)**), o que pode ser explicado pela seca ocorrida no ano de 2010 e a baixa umidade relativa do ar entre os meses de maio e agosto (colheita da cana-de-açúcar) de 2010, favorecendo o aumento das queimadas (AGUIAR et al., 2011).



**Figura 3.3** - Área percentual (**Figura 3.3(a)**) e total (**Figura 3.3(b)**) de cana crua e cana queima no Estado de São Paulo entre os anos de 2006 e 2012.  
 Fonte: Projeto Canasat (INPE, 2013).

Ainda de acordo com Aguiar et al. (2011), a diminuição da queimada pré-colheita está relacionada com a criação do Protocolo Etanol Verde, que se mostra positivo no sentido de incentivar a adoção da colheita mecânica da cana-de-açúcar, em especial sobre as áreas de expansão do cultivo, sendo que todas as Regiões Administrativas (RAs) do Estado de São Paulo (**Figura 3.4**) apresentaram um aumento na proporção de área colhida mecanicamente entre 2006 e 2011.



**Figura 3.4** - Localização das RAs do Estado de São Paulo.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Atualmente, os produtos de fogo derivados de sensores orbitais são a fonte de dados mais utilizada para estimar a biomassa queimada, sendo que para a estimativa da biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar a partir da FRP é necessário primeiramente encontrar o coeficiente que relaciona a FRP e a *TBQ*. Nesse capítulo serão apresentados os produtos de fogo utilizados, a descrição do experimento de combustão em pequena escala e a metodologia aplicada durante o trabalho.

### **4.1 Principais sensores orbitais utilizados para estimar a FRP**

#### **4.1.1 MODIS/Terra e Aqua**

O sensor MODIS está a bordo dos satélites Terra e Aqua, de órbita polar a uma altitude de 700 km, e possui uma resolução radiométrica de 12 *bits*, operando em 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 $\mu$ m a 14,4 $\mu$ m com uma resolução espacial de 250, 500 ou 1000 metros dependendo do produto em questão e resolução temporal de 1 a 2 dias. Esse sensor foi configurado para fornecer dados sobre a dinâmica da biosfera terrestre visando a compreensão dos processos que ocorrem na superfície da terra, nos oceanos e na atmosfera inferior, causadas por atividades antrópicas ou pela própria natureza (JUSTICE et al., 2002).

O horário de passagem do MODIS sobre um ponto da superfície terrestre varia de acordo com a plataforma; enquanto a plataforma Terra (produtos designados com a sigla MOD) cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min; a plataforma Aqua, (produtos designados com a sigla MYD), em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min, possibilitando, desta forma, 4 imageamentos diários de um ponto da superfície terrestre (GIGLIO, 2005).

Os produtos de fogo do MODIS (MOD14 e MYD14), disponibilizados pelo banco de dados *Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System* (LAADS Web), fornecem a localização de focos de queimada baseando-se na emissão dos alvos nos

comprimentos de onda centrados em 4 $\mu$ m e 11 $\mu$ m a uma resolução espacial nominal de 1 km (ICHOKU et al., 2012).

As variáveis utilizadas durante o estudo extraídas do MOD14 e do MYD14 são a latitude, a longitude, a FRP, a hora de aquisição do foco e a área do *pixel*. Como os produtos de fogo derivados do MODIS não apresentam a variável ângulo de visada, o mesmo é calculado a partir da Equação 4.1 (ICHOKU; KAUFMAN. 2005):

$$\theta = \left( -\frac{1}{2}N.S + \frac{1}{2}S + (1 - i)S \right) \quad (4.1)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de visada calculado para um determinado *pixel*  $i$ ,  $N$  é o número da coluna do *pixel*,  $S$  é a razão entre a resolução espacial do *pixel* no nadir e a altitude do sensor.

#### 4.1.2 SEVIRI/METEOSAT

O SEVIRI está a bordo da segunda geração de satélites geoestacionários *METEOrological SATellite* (METEOSAT) a uma altitude de cerca de 36.000 km. O sensor consiste de um radiômetro imageador que obtêm dados a cada 15 minutos, tornando-o ideal para a identificação de focos de queimada que ocorrem em um curto período, como é o caso das queimadas para a colheita da cana-de-açúcar. O SEVIRI fornece dados com resolução radiométrica de 10 *bits*, encontra-se centrado na África e Europa e opera em 12 canais espectrais localizados nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, com resolução espacial de 3 km no nadir e resolução espacial média no Brasil de 6 km, podendo chegar a mais de 8 km (ROBERTS; WOOSTER, 2008).

O produto de fogo do SEVIRI (FRP-PIXEL) é disponibilizado pela *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility* (LAS SAF). Assim como para os produtos de fogo do sensor MODIS, as variáveis utilizadas do produto de fogo derivado do SEVIRI

foram a latitude, a longitude, a FRP, a hora de aquisição e a área do *pixel*; porém o FRP-PIXEL já disponibiliza o ângulo de visada no momento da aquisição dos dados que originam o produto.

#### **4.1.3 GOES *Imager*/GOES**

O sensor GOES *Imager*, a bordo da constelação geostacionária *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), cobre o espectro eletromagnético em cinco bandas, do visível ao infravermelho termal, sendo as bandas centradas em 3,9 $\mu$ m e 11 $\mu$ m utilizadas no algoritmo para detecção de focos de queimada (ZHANG; KONDRAGUNTA, 2008). Devido às características de sua órbita, a uma altitude de aproximadamente 35.800 km é possível a aquisição de dados a cada 30 minutos, com resolução espacial nominal de 2,3 km por 4 km e resolução radiométrica de 10 *bits*.

O *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA), disponibilizado pelo NOAA *Geostationary Satellite Server*, é o produto do GOES destinado à detecção de focos de queimada. Os dados disponibilizados por esse produto de fogo apresentam a hora da passagem do satélite, a longitude, a latitude, o ângulo de visada do satélite, a área do *pixel*, a temperatura de brilho em 3,9 $\mu$ m e 11 $\mu$ m, a temperatura e a área do *subpixel* com fogo, a FRP e o tipo de ecossistema (KOLTUNOV et al., 2012), sendo as variáveis utilizadas a latitude, a longitude, a hora de aquisição, a área do *pixel* e o ângulo de visada.

## **4.2 Dados Complementares**

### **4.2.1 Projeto Canasat**

Considerando a rápida expansão e as características favoráveis da cultura da cana-de-açúcar para ser monitorada por imagens de satélite, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolve, desde 2003, o projeto Canasat, que mapeia anualmente as áreas cultivadas de cana-de-açúcar na região Centro-sul do Brasil (RUDORFF et al., 2010). O projeto Canasat, desenvolvido em conjunto com a UNICA, com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) (AGUIAR et al., 2007), determina as áreas de cultivo de cana-de-açúcar através da classificação digital e da interpretação visual de imagens de

sensoriamento remoto orbital dos sensores *Thematic Mapper (TM)*, *Linear Imaging Self-Scanner (LISS-III)*, *Enhanced Thematic Mapper (ETM)* e *Couple Charged Device (CCD)*, entre outros.

Desde 2006, o projeto Canasat também disponibiliza o mapeamento do tipo de colheita da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo, possibilitando o monitoramento das áreas de cana crua e cana queima e a avaliação da efetividade da adoção do Protocolo Etanol Verde na antecipação do fim da prática das queimadas na colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (AGUIAR et al., 2011).

O mapeamento do projeto Canasat foi utilizado para determinar se a ocorrência dos focos de queimada detectados pelos produtos de fogo anteriormente descritos estava relacionada à queimada pré-colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

### **4.3 Experimento de combustão em pequena escala**

#### **4.3.1 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 (MANUAL DA FLIR, 2013).

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. 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.

#### 4.3.2 Descrição do experimento de combustão em pequena escala

O experimento para estimar a FRP, determinar o coeficiente que relaciona a FRP e a *TBQ* e analisar os erros introduzidos pelo *background* e pelo ângulo de visada a partir da queima de quantidades controladas da palha de cana-de-açúcar 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. Anteriormente ao experimento, foram feitas duas coletas de palha seca de cana-de-açúcar na CanaVialis (dias 30/04/2013 e 05/06/2013 respectivamente), unidade da empresa Monsanto especializada em cana-de-açúcar.

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).

A palha de cana-de-açúcar coletada (**Figura 4.1(a)**), foi separada e pesada (**Figura 4.1(b)**) de acordo com os pesos previamente estabelecidos (**Tabela 4.1**), totalizando 204 amostras com peso total de 23,4 kg. Durante o experimento, a câmera termal (**Figura 4.1(c)**) foi posicionada para os ângulos de visada de 0°, 10°, 20°, 30° e 40° em relação às amostras de biomassa submetidas ao processo de combustão (**Figura 4.1(d)**). Apesar de serem submetidas ao processo de combustão 204 amostras, algumas foram perdidas ou removidas da análise inicial, como será discutido em seguida, sendo que no total foram analisadas 179 amostras.



**Figura 4.1** - Etapas realizadas para a execução do experimento de combustão. A palha da cana-de-açúcar (4.1 (a)) foi separada e pesada (4.1(b)) de acordo com a Tabela 4.1. A Figura 4.1(c) mostra a câmera termal posicionada com ângulo de visada de 20° durante a queima de uma amostra e a Figura 4.1(d) apresenta uma amostra de palha de cana-de-açúcar de 200g durante o processo de combustão.

**Tabela 4.1** - Peso de cada amostra, número de amostras para cada ângulo de visada e total de amostras e pesos utilizados no experimento de combustão em pequena escala.

Peso da Amostra (g)	Ângulo de Visada					Peso (kg)	Total de Amostras
	0°	10°	20°	30°	40°		
50	38	5	5	5	6	2,95	59
75	5	5	5	5	6	1,95	26
100	10	5	5	5	6	3,1	31
150	10	5	5	5	6	4,65	31
175	5	5	5	5	6	4,55	26
200	10	5	5	5	6	6,2	31
<b>Peso Total (kg)</b>						<b>23,4</b>	<b>204</b>

Na **Tabela 4.1** é possível verificar o maior número de amostras para o ângulo de visada de 0°, onde pesos de 50g, 100g, 150g e 200g foram também utilizados para analisar o efeito do *background*. Ainda, observa-se um número maior de amostras para o ângulo de visada de 40°, uma vez que essa ótica 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 40°.

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 queima de cada amostra. Apesar do bloqueio com tapumes de madeira para evitar a influência do vento, como se percebe pela **Figura 4.1(c)**, algumas amostras foram influenciadas por essa variável, e foram, dessa forma, removidas da análise inicial e analisadas separadamente.

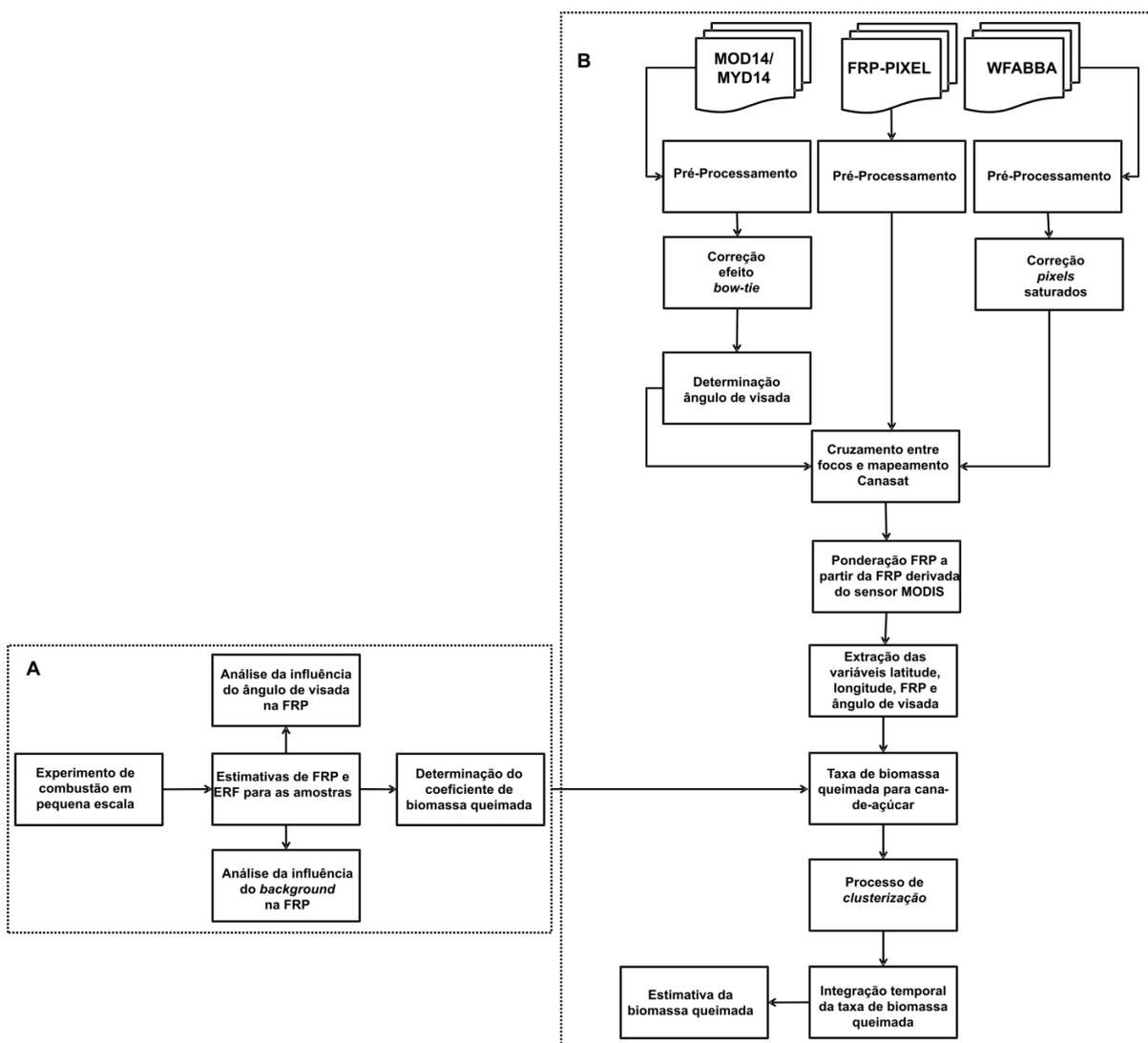
Para algumas amostras, notava-se claramente o teor mais alto de umidade, o que dificultava ou até mesmo impedia o início do processo de combustão. As amostras mais úmidas, assim como as amostras influenciadas pelo vento, também foram removidas da análise inicial e analisadas separadamente. Após o experimento, algumas amostras que estavam mais úmidas foram encaminhadas para a EMBRAPA Meio Ambiente a fim de analisar seu teor de umidade, cujo teor de umidade estava em torno de 18,58%.

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 (**Figura 4.1(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 (80°C), considerando a faixa de temperatura entre 200°C e 1200°C.

## 4.4 Metodologia

### 4.4.1 Fluxograma da metodologia

A metodologia aplicada (**Figura 4.2**) pode ser dividida em dois blocos (Bloco A e Bloco B), com o Bloco A representando a metodologia aplicada para a análise dos resultados do experimento de combustão em pequena escala, e o Bloco B representando a metodologia para o processamento dos produtos de fogo. A metodologia será explicada em detalhes nos itens abaixo.



**Figura 4.2** - Fluxograma da metodologia dividido em dois blocos principais. O Bloco A corresponde ao processamento dos resultados do experimento de combustão em pequena escala e o Bloco B corresponde ao processamento dos produtos de fogo.

#### 4.4.2 Estimativa da FRP e da FRE a partir do experimento de combustão em pequena escala

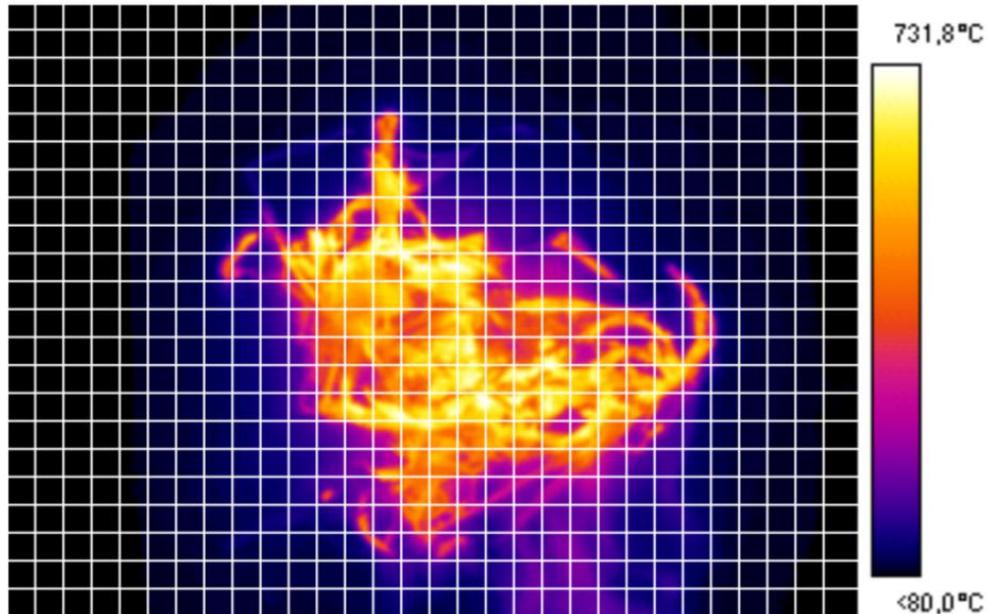
Os dados gerados pela câmera termal durante o experimento de combustão em pequena escala foram processados no *software* MATLAB, tendo como variáveis de saída após o processamento a FRP, a FRE, a área queimada e o tempo de combustão para cada uma das amostras.

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* (**Figura 4.3**) gerados pela câmera termal foi estimada a partir da Equação 2.1 considerando a emissividade igual a 1. Cabe ressaltar que os *pixels* com temperatura inferior a 80°C 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, conseqüentemente, estavam a uma altura diferente em relação ao sensor.

Para a estimativa da FRP de cada *frame* ( $FRP_{frame}$ ) utilizou-se a Equação 4.2:

$$FRP_{frame} = \sum FRP_{pixel} \quad (4.2)$$

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).

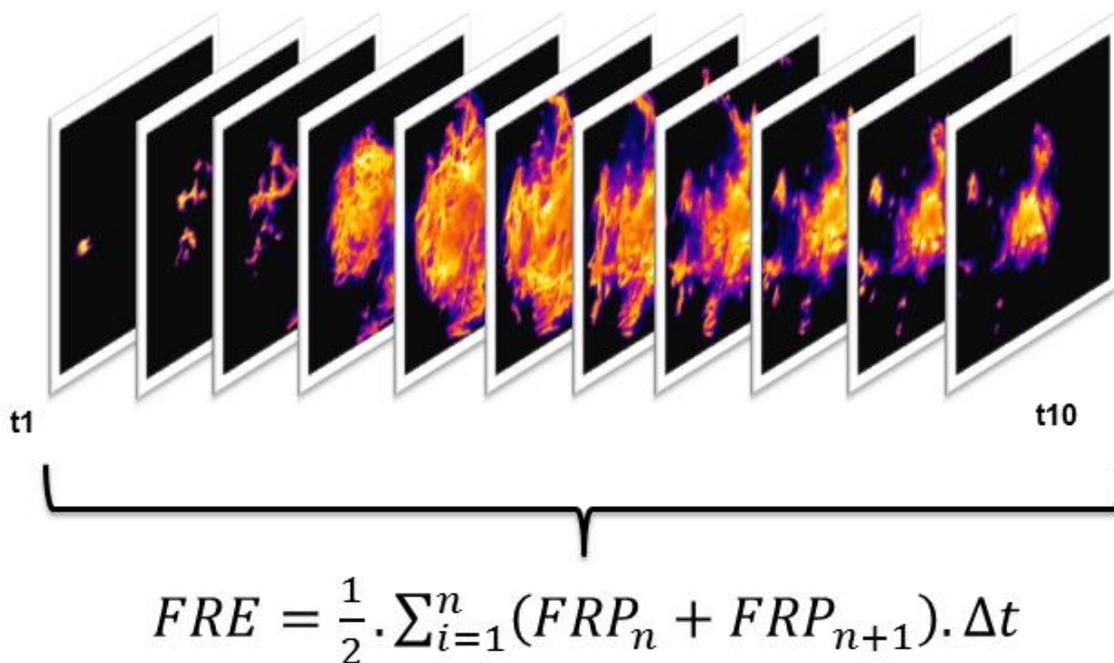


**Figura 4.3** - *Frame* gerado pela câmera termal sobreposto pela representação dos *pixels* contidos no *frame*. *Pixels* cuja temperatura era inferior a 80° C (cor preta) foram desconsiderados na estimativa da  $FRP_{pixel}$ .

Com base nas estimativas de FRP e seus respectivos horários de ocorrência, a FRE de cada amostra (**Figura 4.4**) foi estimada pela Equação 4.3:

$$FRE = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1}) \cdot \Delta t \quad (4.3)$$

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  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (s) entre as estimativas.



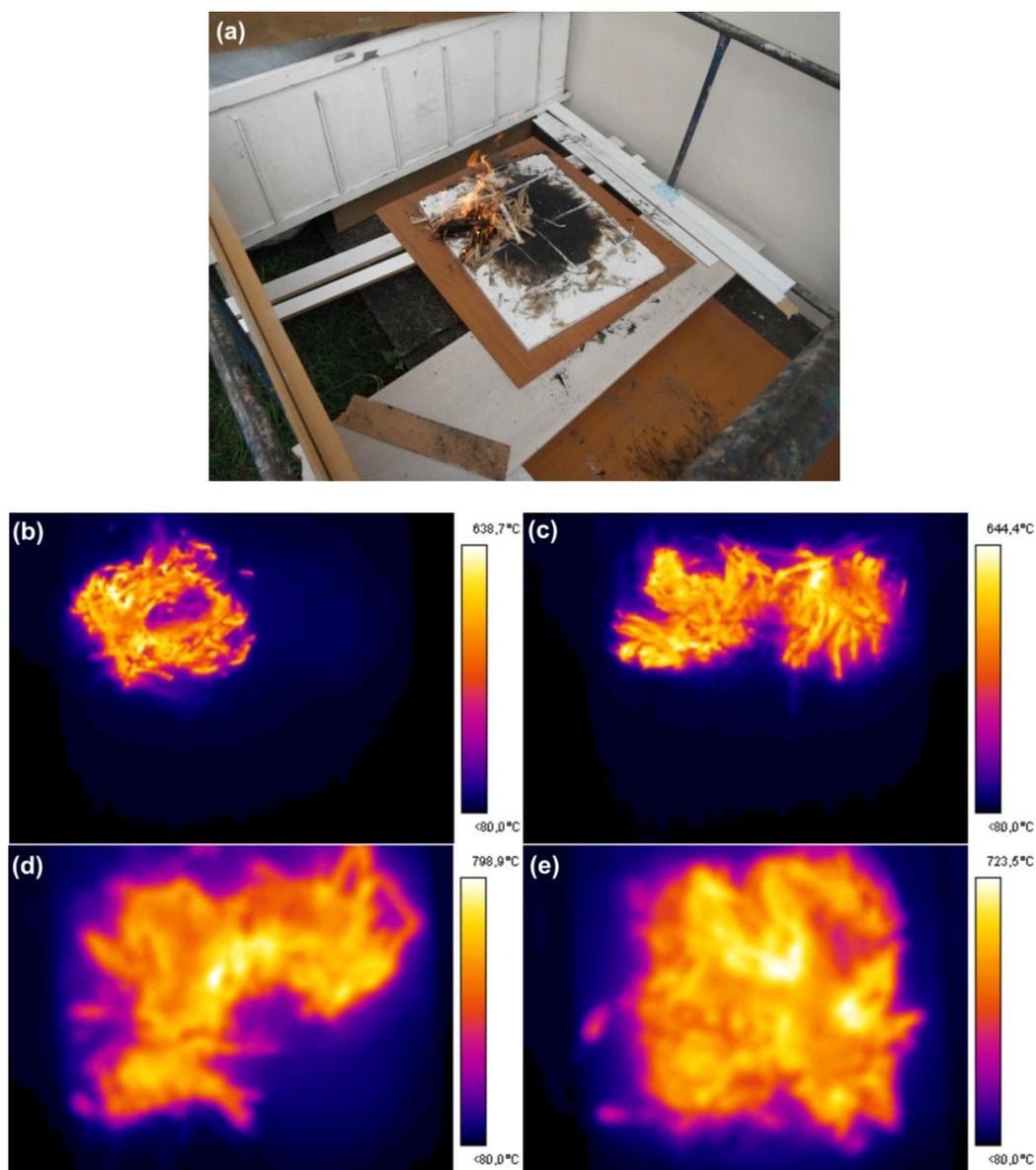
**Figura 4.4** - Exemplo de estimativa da FRE para uma amostra. t1 e t10 representam, respectivamente, o início e o final do processo de combustão. A FRE foi estimada a partir da integração FRP de cada *frame*, como demonstrado na Equação 4.3.

#### 4.4.3 Análise da influência do *background* na estimativa da FRP

Para analisar a influência do *background* na estimativa da FRP, definiu-se uma área de interesse e a mesma foi dividida em 4 quadrantes (**Figura 4.5(a)**). Foram realizadas 5 amostras com 50g de palha de cana-de-açúcar preenchendo completamente um quadrante (**Figura 4.5(b)**), 100g preenchendo completamente 2 quadrantes (**Figura 4.5(c)**), 150g preenchendo completamente 3 quadrantes (**Figura 4.5(d)**) e 200g preenchendo completamente 4 quadrantes (**Figura 4.5(e)**).

Nas estimativas descritas no tópico acima, considerou-se os *pixels* com temperatura menor que 80° C como *background* e os mesmos foram excluídos da estimativa da FRP. Já para a análise da influência do *background* foi atribuída a temperatura da palha da cana-de-açúcar para todos os *pixels* pertencentes aos quadrantes com temperatura menor que 80° C, e os mesmos foram contabilizados na estimativa da FRP. A medida da temperatura da palha da cana-de-açúcar antes do início da combustão foi realizada com

a câmara de termal na faixa de temperatura de 0° C a 350° C, sendo o valor encontrado de 20° C.



**Figura 4.5** - A **Figura 4.5(a)** exemplifica a combustão de uma amostra em 1quadrante; nota-se os 4 quadrantes pela marcação branca na plataforma. As **Figuras 4.5(b), 4.5(c), 4.5(d) e 4.5(e)** representam, respectivamente, um *frame* com a biomassa preenchendo 1, 2, 3 e 4 quadrantes.

A **Figura 4.6** exemplifica a estimativa da FRP com e sem o *background* em um caso hipotético. No exemplo, foi simulada a estimativa da FRP para 3 tempos, e considerada a área de cada *pixel* 1 m<sup>2</sup> e  $\varepsilon$  igual a 1, com os valores da temperatura em vermelho dentro de cada *pixel*. No tempo 1, o somatório da FRP com *background* é maior do que 0 W, já que a temperatura da palha da cana-de-açúcar (em K) foi atribuída aos quadrantes considerados com *background*. Já no tempo 2, com o início da combustão, que eleva a temperatura de um *pixel* a 600 K, a diferença entre o somatório da FRP com e sem *background* chega a mais de 900 W. Para o tempo 3, com o espalhamento do fogo sobre a amostra e nenhum *pixel* considerado como *background*, o somatório da FRP com o *background* seria o mesmo que o somatório da FRP sem o *background*.

	Sem Background	Com Background								
<b>tempo 1</b>	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table> <p><math>\Sigma \text{FRP} = 0 \text{ W}</math></p>	0	0	0	0	<table border="1"> <tr><td>293</td><td>293</td></tr> <tr><td>293</td><td>293</td></tr> </table> <p><math>\Sigma \text{FRP} = 1674 \text{ W}</math></p>	293	293	293	293
0	0									
0	0									
293	293									
293	293									
<b>tempo 2</b>	<table border="1"> <tr><td>600</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> </table> <p><math>\Sigma \text{FRP} = 7779,8 \text{ W}</math></p>	600	0	0	0	<table border="1"> <tr><td>600</td><td>293</td></tr> <tr><td>293</td><td>293</td></tr> </table> <p><math>\Sigma \text{FRP} = 8716 \text{ W}</math></p>	600	293	293	293
600	0									
0	0									
600	293									
293	293									
<b>tempo 3</b>	<table border="1"> <tr><td>800</td><td>600</td></tr> <tr><td>700</td><td>600</td></tr> </table> <p><math>\Sigma \text{FRP} = 51625 \text{ W}</math></p>	800	600	700	600	<table border="1"> <tr><td>800</td><td>600</td></tr> <tr><td>700</td><td>600</td></tr> </table> <p><math>\Sigma \text{FRP} = 51625 \text{ W}</math></p>	800	600	700	600
800	600									
700	600									
800	600									
700	600									

**Figura 4.6** – Exemplo da FRP estimada para uma mesma amostra com e sem o *background* presente na estimativa.

#### 4.4.4 Determinação do coeficiente de biomassa queimada

Para a determinação do coeficiente de biomassa queimada utilizou-se as amostras que não foram influenciadas pelo vento e pelo alto teor de umidade, ainda, os *outliers*, definidos como duas vezes o desvio padrão da média, foram removidos para a determinação do coeficiente de biomassa queimada. Além da relação entre a biomassa queimada e a FRP para a cana-de-açúcar, o modelo de regressão gerado também considerou o ângulo de visada. Como o ângulo de visada é específico para cada estimativa de FRP feita por meio de sensores orbitais, o modelo de regressão foi aplicado a cada estimativa de FRP proveniente do MODIS, do SEVIRI ou GOES *Imager* antes da integração das estimativas necessária para se chegar ao total de biomassa queimada. Os resultados encontrados foram submetidos ao teste t-Student.

Apesar do experimento de combustão em pequena escala utilizar amostras com peso máximo de 200g, os resultados encontrados podem ser extrapolados para áreas com biomassa disponível para queima superior a esse valor, uma vez que a relação entre *TBQ* e a FRP é linear, como demonstrado por Wooster et al. (2002) e Wooster et al. (2005). O coeficiente encontrado por Wooster et al. (2005), obtido com amostras de biomassa da savana africana com peso máximo de 6 quilos (kg), foi extrapolado para o Sul do continente africano por Roberts et al. (2005) e apresentou boa concordância com estimativas obtidas em campo, com desempenho melhor que metodologias que utilizam a área queimada.

#### 4.4.5 Processamento dos produtos de fogo

As etapas da metodologia aplicada para o processamento dos produtos de fogo, desenvolvida por Pereira (2013), estão presentes no Bloco B da **Figura 4.2** e são apresentadas em maior destaque na **Figura 4.7**. A primeira etapa consiste na aquisição dos produtos de fogo, a partir de *file transfer protocol* (FTP) disponibilizada gratuitamente pelos centros de pesquisa mencionados na descrição dos produtos de fogo.

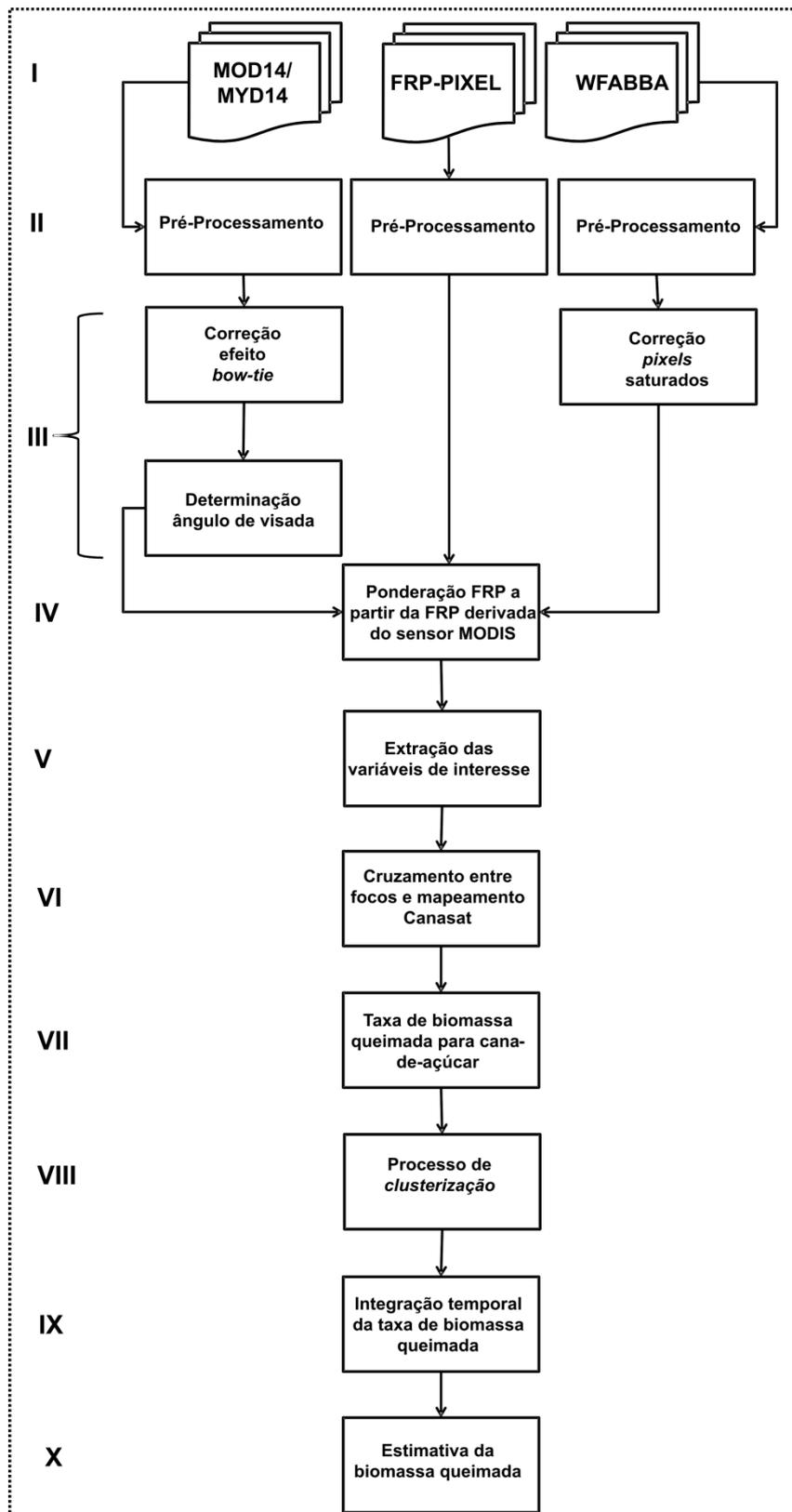


Figura 4.7 - Fluxograma adotado para o processamento dos produtos de fogo.

Para cada produto de fogo, realiza-se um pré-processamento para transformar seus diferentes formatos no padrão *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) contendo as mesmas informações dos produtos originais. O produto FRP-PIXEL é disponibilizado em formato *Hierarchical Data Format* versão 5 (HDF5), enquanto o MOD14 e o MYD14 são disponibilizados em formato HDF versão 4 (HDF4); já o WFABBA é disponibilizado diretamente em formato ASCII. Para a conversão dos produtos derivados do SEVIRI e do MODIS em ASCII é necessária a aplicação de programas em *Interactive Data Language* (IDL) ou em FORTRAN.

#### 4.4.5.1 Processamento MOD14 e MYD 14

Para o MOD14 e o MYD 14, em um primeiro momento os *pixels* de baixa confiabilidade (menor que 30%) são eliminados, sendo então calculados o ângulo de visada (Equação 4.1) e a área de cada *pixel*, de acordo com a Equação 4.4, proposta por Ichoku e Kaufman (2005).

$$A_{real} = \left\{ R_e \cdot S \cdot \left[ \frac{\cos\theta}{\sqrt{(R_e/r)^2 - \sin^2\theta}} - 1 \right] \right\} \cdot \left\{ r \cdot S \left( \cos\theta - \sqrt{(R_e/r)^2 - \sin^2\theta} \right) \right\} \quad (4.4)$$

em que  $A_{real}$  é a área real do *pixel*,  $R_e$  é o raio da Terra (6378,13 km),  $r$  é a soma de  $R_e$  e a altitude do sensor (705 km para o MODIS),  $S$  é a razão entre a resolução espacial de um *pixel* do MODIS no nadir (1 km) e a altitude do sensor e  $\theta$  é o ângulo de visada do *pixel*.

Ainda, considerando as características geométricas do MODIS, que pode operar com um ângulo de imageamento de até  $\pm 55^\circ$ , tem-se o efeito *bow-tie*, que consiste na sobreposição da área que formará um determinado *pixel* devido ao aumento do ângulo de visada, com a principal influência do efeito *bow-tie* na estimativa da FRP a repetição de um mesmo foco em *pixels* adjacentes (PEREIRA, 2013). Em *pixels* mais afastados do nadir (bordas da imagem, com ângulo de visada maior que  $40^\circ$ ) um foco de queimada detectado pode ser representado por dois ou até mesmo três *pixels* adjacentes (FREEBORN et al., 2011).

Para corrigir o efeito *bow-tie* nas estimativas de FRP do MOD14 e MYD14 existem alguns ajustes, como os propostos por Freeborn et al. (2011) e Kaiser et al. (2012), que minimizam a replicação dos focos de queimada em *pixels* adjacentes. A correção do efeito *bow-tie* foi realizada a partir da Equação 4.5, proposta por Kaiser et al. (2012) em que a FRP estimada a partir do MODIS é ponderada pelo cosseno ao quadrado do ângulo de visada.

$$FRP_{corrigida} = FRP_{MODIS} \cdot \cos^2 \theta \quad (4.5)$$

em que  $FRP_{corrigida}$  é a FRP corrigida para o efeito *bow-tie* (MW),  $FRP_{MODIS}$  é a FRP estimada a partir do MODIS (MW) e  $\theta$  é o ângulo de visada, calculado a partir da Equação 10.

Ao final dos processamentos acima descritos foi gerado um arquivo em formato ASCII contendo os seguintes dados em relação aos focos de queimada detectados pelo MODIS: latitude, longitude, FRP, ângulo de visada, hora de aquisição e área do *pixel*.

#### **4.4.5.2 Processamento FRP-PIXEL**

Para o produto FRP-PIXEL, inicialmente os dados em formato HDF5 foram convertidos para ASCII por meio de programação em IDL, e os *pixels* com confiabilidade menor que 30% excluídos.

O passo seguinte do processamento do produto de fogo derivado do SEVIRI consiste na ponderação da FRP a partir da FRP estimada pelo sensor MODIS, uma vez que a FRP estimada a partir do SEVIRI é subestimada quando comparada à FRP do MODIS, devido principalmente à diferença entre as resoluções espaciais dos sensores, o que inviabiliza a detecção de focos de queimada menores pelo FRP-PIXEL (PEREIRA, 2013). Em média, a FRP derivada do SEVIRI é subestimada entre 30% e 50% em relação ao MODIS (ROBERTS et al., 2008), sendo que a mesma foi corrigida em 40% referente à média mensal dos dados. Em seu estudo, Roberts et al. (2008) compararam a

FRP derivada do MODIS e do SEVIRI de aproximadamente 300 focos simultâneos, e chegaram à conclusão de que a FRP entre 40 MW e 3000 MW possui uma boa concordância, no entanto a FRP derivada do SEVIRI é superestimada abaixo de 40 MW e subestimada acima de 3000MW, quando comparada ao MODIS. Ao fim das etapas descritas, o algoritmo aplicado origina um ASCII com as variáveis latitude, longitude, FRP, ângulo de visada, hora de aquisição e área do *pixel*.

#### 4.4.5.3 Processamento WFABBA

Para o WFABBA, os dados disponibilizados, que são distribuídos em formato ASCII, foram processados em um primeiro momento em linguagem FORTRAN a fim de eliminar os *pixels* cuja confiabilidade era baixa. Diferentemente dos outros produtos descritos acima, nota-se para o WFABBA uma quantidade considerável de *pixels* saturados, isto é devido ao ponto de saturação do GOES *Imager* ser menor do que o ponto de saturação do MODIS e do SEVIRI; sendo assim queimadas que apresentam maior tamanho e temperatura são perdidas, ocasionando a omissão de queimas importantes de biomassa (PEREIRA, 2009).

Para diminuir o número de *pixels* saturados, optou-se por estimar a FRP a partir do método proposto por Wooster (2003), que é baseado na premissa que a radiância espectral ( $M_\lambda$ ) emitida na região do IVM, região espectral cuja  $M_\lambda$  emitida por uma queimada é máxima, é linearmente proporcional à FRP. Sendo assim, a FRP foi estimada a partir da Equação 2.5 para a banda do GOES *Imager* centrada em 3,9  $\mu\text{m}$ , com a  $M_\lambda$  estimada através da Equação de Planck expressa pela Equação 4.6:

$$M(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{C_1}{e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)} - 1} \quad (4.6)$$

em que  $M_\lambda$  representa a emitância radiante espectral,  $\lambda$  é o comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ ),  $C_1$  e  $C_2$  são constantes (respectivamente  $3,74 \cdot 10^8 \text{ W.m}^{-2}$  e  $1,44 \cdot 10^4 \mu\text{m.K}$ ) e  $T$  é a temperatura (K).

Por fim, foi realizada a ponderação da FRP do WFABBA a partir da FRP derivada do MODIS. Para a ponderação foi utilizado como base o trabalho realizado por Xu et al. (2010), que comparou a FRP derivada dos produtos do MODIS e do GOES *Imager*, sendo que as estimativas de FRP inferiores a 1000 MW são corrigidas em 17% e as estimativas de FRP superiores a 1000 MW corrigidas em 41%. Após o processamento, gerou-se um arquivo em formato ASCII com as variáveis latitude, longitude, FRP, ângulo de visada, hora de aquisição e área do *pixel*.

#### **4.4.5.4 Determinação da taxa de biomassa queimada e estimativa da biomassa queimada**

Após o processamento dos produtos de fogo originaram-se os arquivos ASCII com as variáveis de interesse. O MOD14 e o MYD14 são produtos globais, enquanto que o FRP-PIXEL e o WFABBA são produtos para a América do Sul. Para a biomassa queimada pela queimada pré-colheita da cana-de-açúcar do Estado de São Paulo extraiu-se destes produtos somente os focos de queimada para esta área de estudo no período de 2008 a 2012. Esse procedimento foi realizado em linguagem IDL, sendo que os focos de queimada foram cruzados com o mapeamento temático do cultivo de cana-de-açúcar realizado pelo projeto Canasat para cada um dos anos estudados.

Como existem incertezas em relação a real localização dos dados utilizados, devido às características gerais dos sistemas sensores previamente apresentados, e pretende-se relacionar os focos de queimada com as áreas de cana-de-açúcar, optou-se por criar um *buffer* de 8 km em torno das áreas de cana-de-açúcar definidas pelo mapeamento temático do projeto Canasat, sendo a distância do *buffer* definida como um *pixel* de deslocamento em relação à menor resolução espacial, e a menor resolução espacial, ou seja, 8 km, para o SEVIRI, que pode chegar a esta resolução espacial no Oeste do Estado de São Paulo. O resultado obtido após esse processamento foram os focos de queimada que ocorreram em áreas de cultivo de cana-de-açúcar entre 2008 e 2012.

Na sequência, foi estimada a taxa de biomassa queimada para a cana-de-açúcar para cada foco utilizando as relações decorrentes do experimento de combustão em pequena

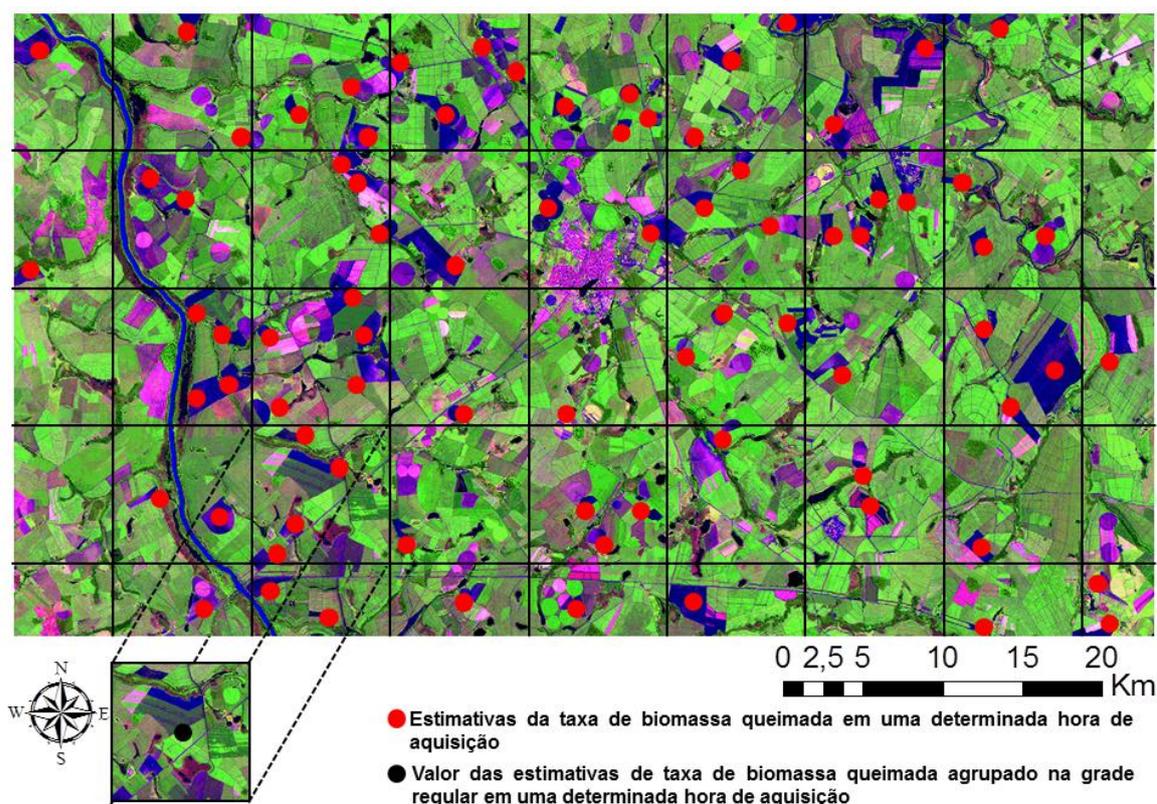
escala (Equação 4.7). As estimativas obtidas serão apresentadas na descrição dos resultados.

$$TBQ_{cana} = (1,85.FRP) - (1,27.cos\theta.FRP) \quad (4.7)$$

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  $\theta$  é o ângulo de visada do sensor no momento da aquisição dos dados.

Deve-se ressaltar que para se chegar à Equação 4.7, 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. (2013) a partir de um experimento de combustão em pequena escala realizado para determinar os fatores de emissão da cana-de-açúcar. Ainda, caso o ângulo de visada fosse maior que 40 graus, a Equação 4.7 seria empregada considerando o ângulo de visada de 40 graus, visto que essa visada foi a maior analisada, e, portanto, a relação encontrada é válida até esse ângulo.

Em seguida, as estimativas de  $TBQ_{cana}$  e a área de cada *pixel* com presença de um ou mais focos de queimada foram agrupados a partir do horário de aquisição dos dados em uma grade regular de 20 km, como o destaque exemplificado na **Figura 4.8**.



**Figura 4.8** - Representação das estimativas de biomassa queimada para os focos de queimada detectados (círculos vermelhos) e agrupamento das estimativas (círculo preto na célula em destaque) em uma grade regular (linhas pretas). Imagem TM/Landsat-5, órbita-ponto 220/075 de 19/04/2011. Composição colorida RGB543.

A taxa de biomassa queimada agrupada ( $TBQ_{ag}$ ) em cada célula da grade regular para cada horário de aquisição é estimada a partir da Equação 4.8:

$$TBQ_{ag(lon,lat,t)} = \sum_{\gamma=-\alpha}^{\alpha} \sum_{\kappa=-\beta}^{\beta} \eta(\gamma, \kappa) \xi(lon + \gamma, lat + \kappa, t) \quad (4.8)$$

em que  $TBQ_{ag(lon,lat,t)}$  é o agrupamento da taxa de biomassa queimada em uma determinada célula da grade regular ( $kg.s^{-1}$ ) para um determinado tempo  $t$ ,  $\eta(\gamma, \kappa)$  é a máscara de convolução que percorre a grade com os valores de taxa de biomassa queimada estimadas a partir de todos os produtos de fogo utilizados  $\xi(lon, lat)$ .

A biomassa queimada é, por fim, estimada a partir da integração das estimativas de  $TBQ_{ag}$  com o uso da variável de horário de aquisição dos focos detectados (Equação 4.9). Ainda, se durante a integração da  $TBQ_{ag}$  o intervalo entre a aquisição dos focos for maior que 4 horas, considera-se que os dois focos detectados são independentes, e a integração se inicia novamente.

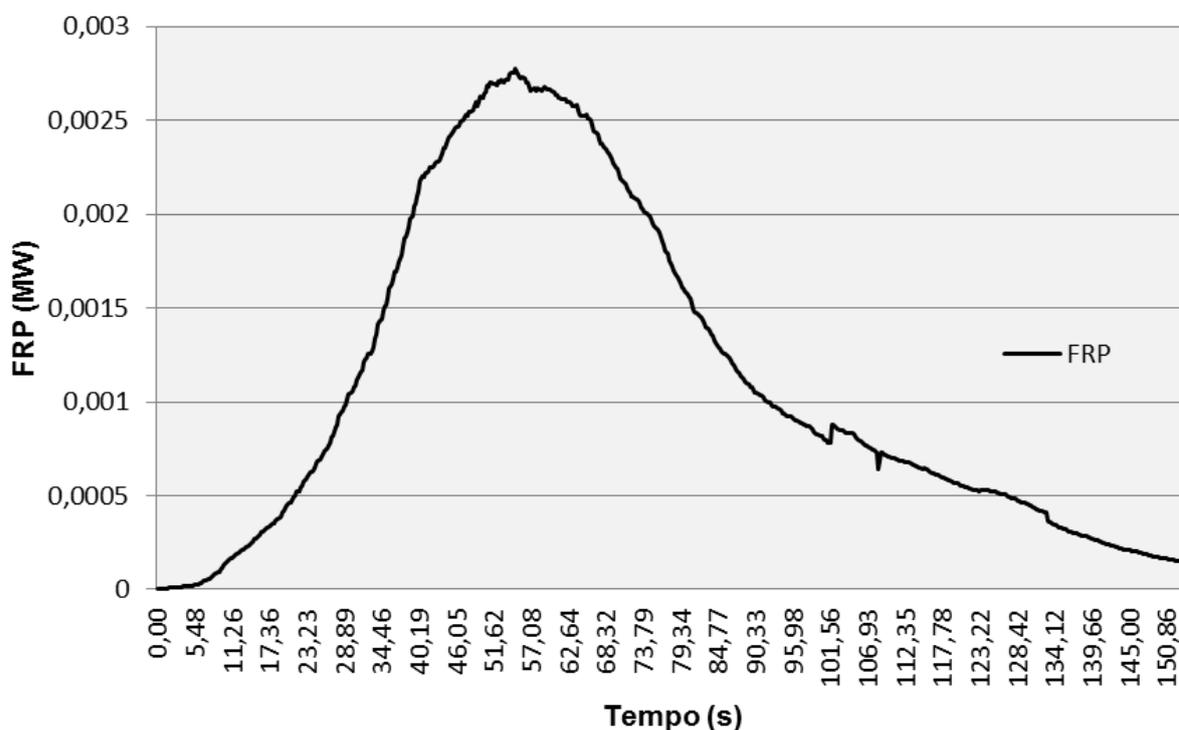
$$BQ_{(lon,lat)} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (TBQ_{ag_n} + TBQ_{ag_{n+1}}) \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (4.9)$$

em que  $BQ_{(lon,lat)}$  é a biomassa queimada para cada célula da grade regular (kg),  $TBQ_{ag}$  é a taxa de biomassa queimada agrupada em cada célula da grade regular ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) para cada tempo  $t$  (s).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Experimento de combustão em pequena escala

A **Figura 5.1** apresenta a FRP estimada no nadir para uma amostra de 100 gramas ao longo do processo de combustão. 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 foi detectada em torno de 54 segundos, chegando a valores próximos de 0,028 MW. 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 100 segundos.



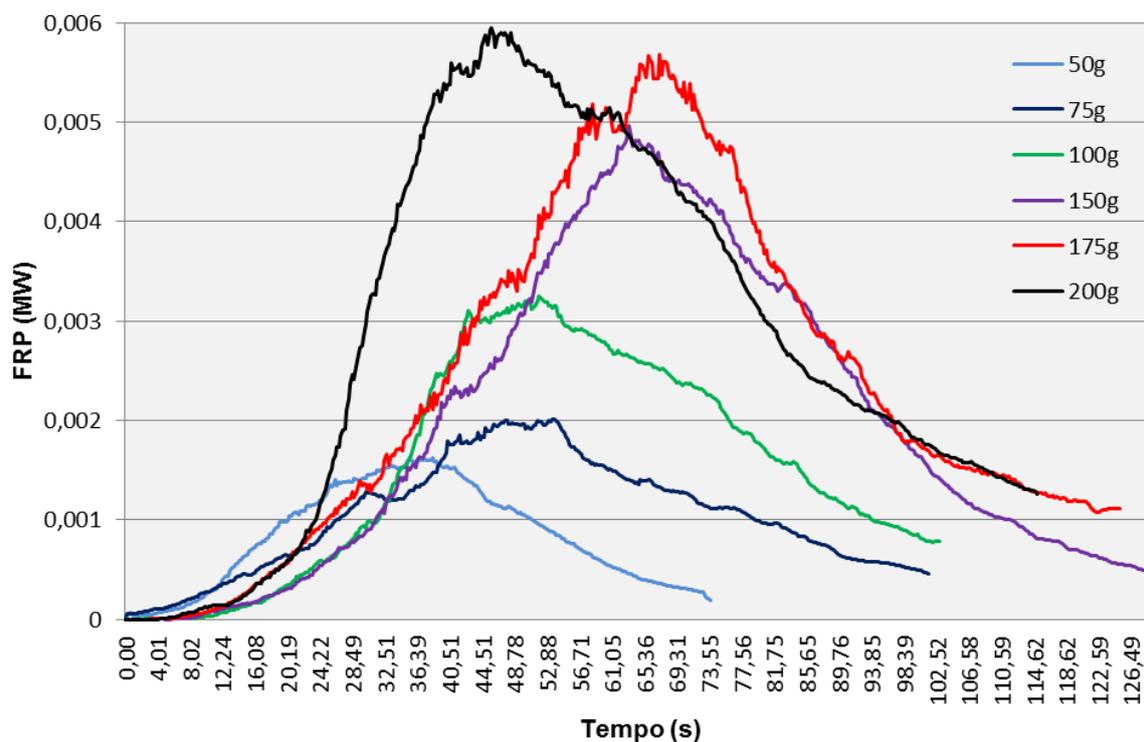
**Figura 5.1** - Estimativa da FRP no nadir ao longo do processo de combustão para uma amostra de 100 gramas de palha de cana-de-açúcar.

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 relacionada à temperatura e, enquanto que a quantidade de biomassa disponível nesta fase é pequena, a temperatura ainda é alta. Assim, para as demais estimativas de FRP geradas como resultado do experimento de combustão em pequena escala a fase *smoldering* foi removida nas amostras em que a mesma era evidente.

Ainda, quando são utilizadas estimativas derivadas de sensores orbitais, pode existir 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 e que no momento não estão contribuindo para a queima de biomassa, situação que pode prejudicar as estimativas de FRP (WOOSTER et al., 2005).

Para diferentes pesos e um mesmo ângulo de visada, a FRP tende a aumentar de acordo com o aumento da biomassa. A **Figura 5.2** 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. 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 5.2**, 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 chama. As estimativas de FRE das amostras apresentadas na **Figura 5.2** estão presentes na **Tabela 5.1**.



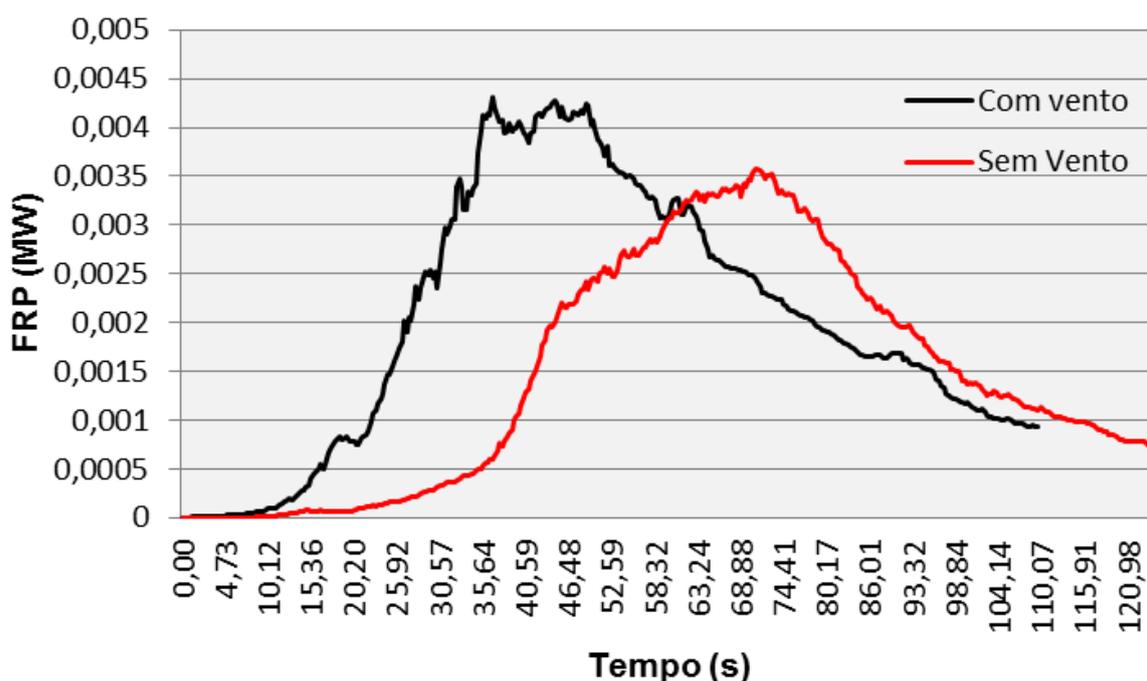
**Figura 5.2** - Estimativas da FRP para amostras de diferentes pesos em uma mesma ótica (câmera termal posicionada no nadir).

**Tabela 5.1** - Estimativa da FRE para as amostras apresentadas na **Figura 5.2**.

<b>Peso (g)</b>	<b>FRE (MJ)</b>
50	0,06
75	0,10
100	0,16
150	0,25
175	0,31
200	0,35

A influência do vento na estimativa da FRP é analisada a partir da **Figura 5.3**. Nesta figura são apresentadas as estimativas da FRP para duas amostras de 175 gramas com ângulo de visada de 30°, 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. 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 30°.

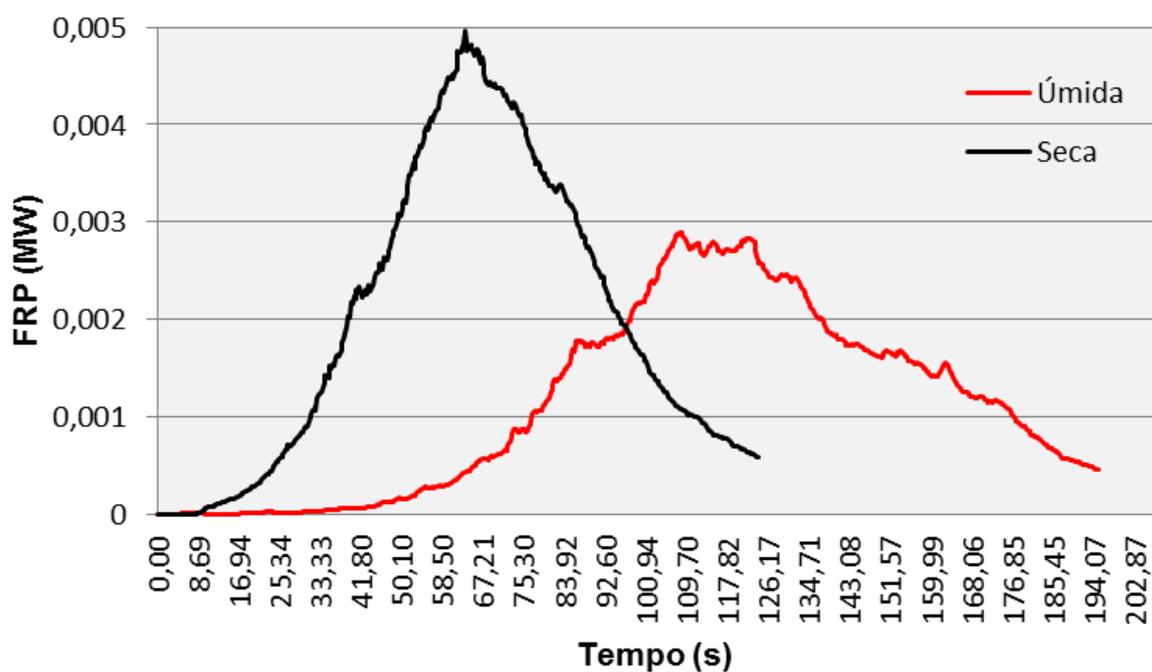


**Figura 5.3** - Estimativa da FRP para duas amostras de 175 gramas, uma com influência do vento (velocidade de 3 km/h) e outra amostra sem vento durante o processo de combustão.

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 5.4**. Em um primeiro momento, o que se destaca na **Figura 5.4** 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).

Para a 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.

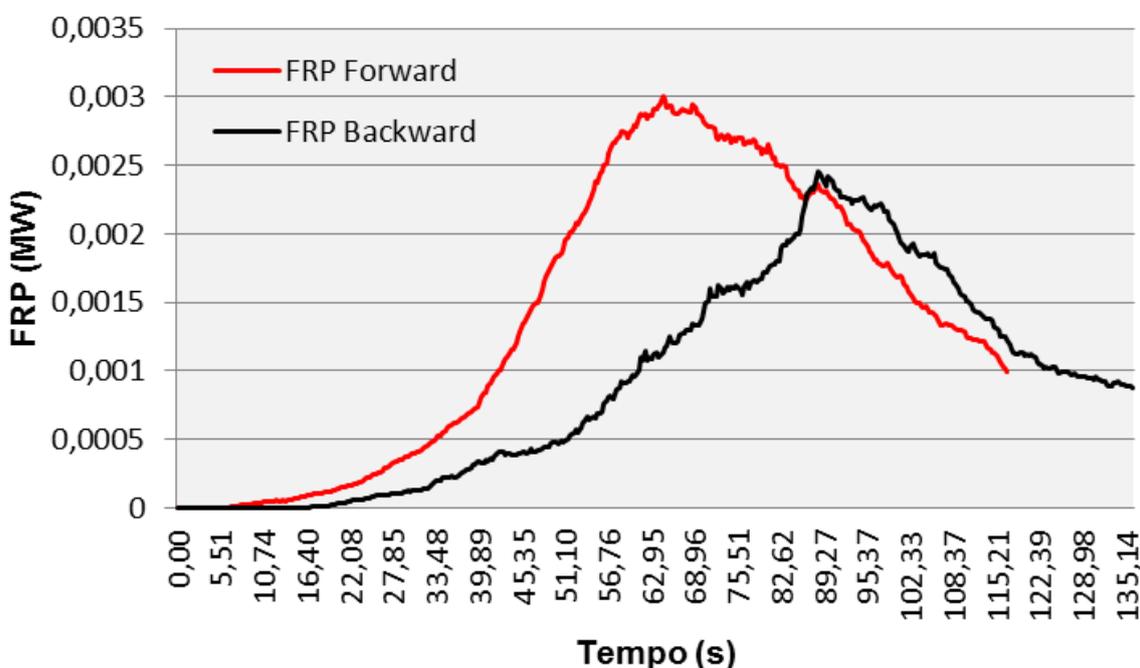


**Figura 5.4** - Estimativa da FRP no nadir para duas amostras de 150 gramas, sendo uma amostra seca e uma amostra úmida.

Nos experimentos de combustão em pequena escala realizados por Wooster et al. (2005) e Freeborn et al. (2008) todas as amostras de biomassa passaram por um processo de

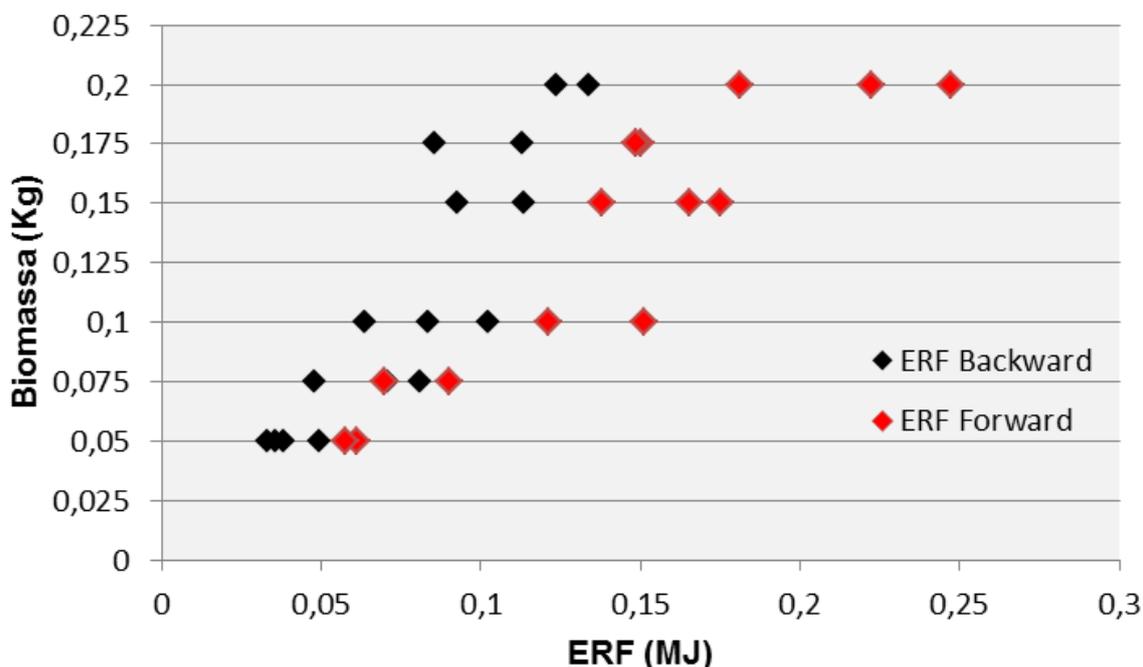
secagem em um forno, a fim de terem o mesmo teor de umidade, 12% e 7,1% respectivamente. Esse procedimento é ideal para ser utilizado em experimentos de combustão em pequena escala, porém o mesmo não realizado neste experimento devido à dificuldade em conseguir a palha da cana-de-açúcar, ao grande volume de palha utilizado (mais de 23 kg) e ao fato do INPE não ter um forno grande de secagem.

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 40°. A **Figura 5.5** compara duas amostras de 200 gramas para as situações descritas acima. 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.



**Figura 5.5** - Estimativa da FRP com ângulo de visada de 40° para duas amostras, uma amostra na posição *forward* e a outra amostra na posição *backward*.

Em relação à FRE das amostras *forward* e *backward*, a FRE das amostras *forward* foi maior, na maioria dos casos, quando comparada à FRE das amostras *backward* (**Figura 5.6**). Valores fora do esperado, como a FRE de 0,08 MJ para uma amostra de 75 gramas na posição *backward*, podem ter sido causados pelo teor de umidade das amostras, visto que essa amostra estava visivelmente mais seca do que as demais.

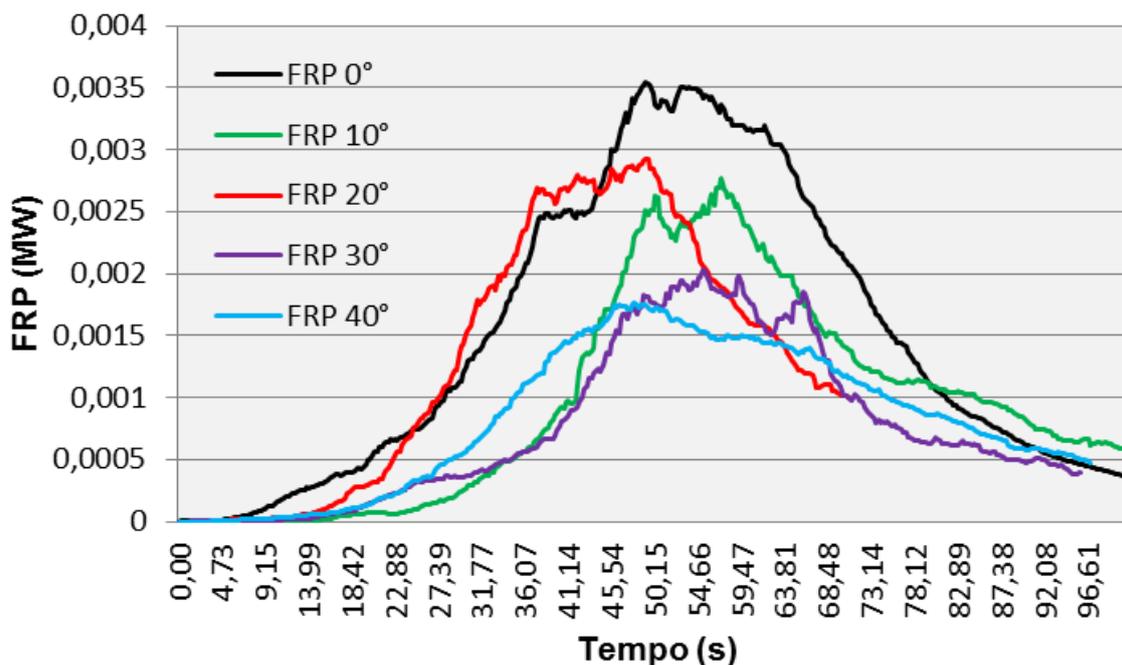


**Figura 5.6** - Estimativas da FRE para a análise da posição do sensor em relação às amostras submetidas ao processo de combustão.

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. Isto permitiria uma comparação mais profunda das estimativas para uma mesma amostra. Como os trabalhos realizados por Freeborn et al. (2008) e Paugam et al. (2013) não realizaram esse tipo de análise, trabalhos futuros com uma infraestrutura mais adequada podem ser feitos para uma análise mais precisa sobre a influência da posição do sensor em relação as chamas na estimativa da FRP.

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 5.7** compara a FRP de 5

amostras de 100 gramas, uma de cada ângulo de visada analisado. Ao comparar a FRP máxima emitida para as amostras presentes na **Figura 5.7** 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).



**Figura 5.7** - Estimativas da FRP para amostras de 100 gramas com diferentes ângulos de visada.

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 afeta a estimativa da temperatura, uma vez que a distribuição da temperatura no *subpixel* será subtendida.

Para a área, nota-se que a área queimada no nadir também é maior, como demonstra a **Figura 5.8**, que compara a área queimada para as mesmas amostras presentes na **Figura**

5.7. 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.

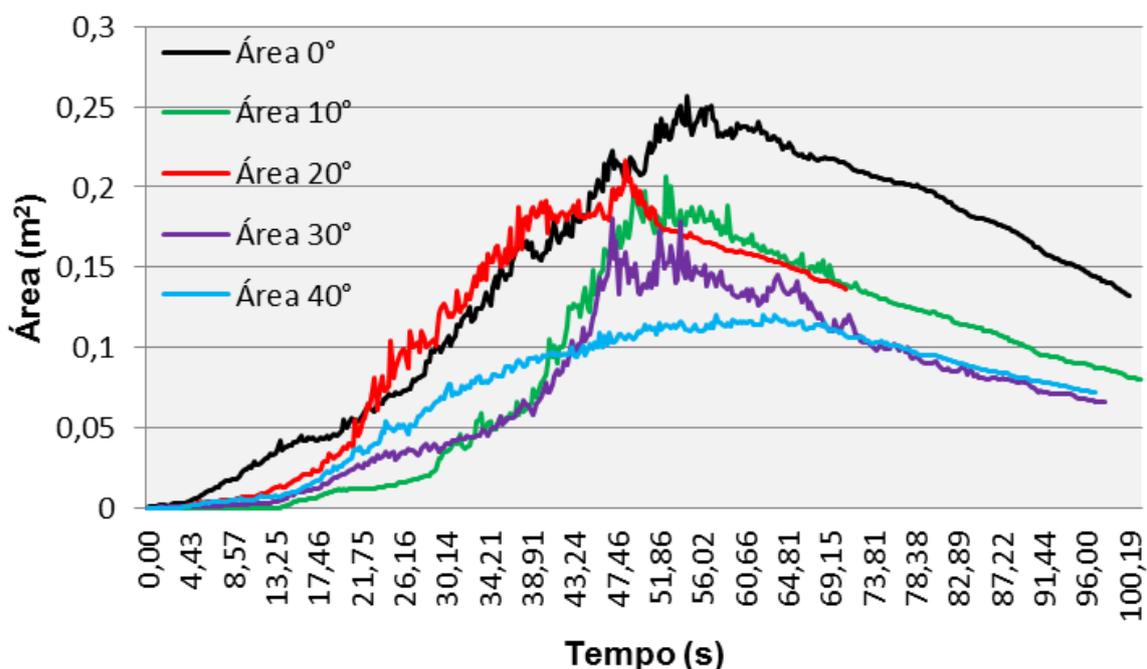
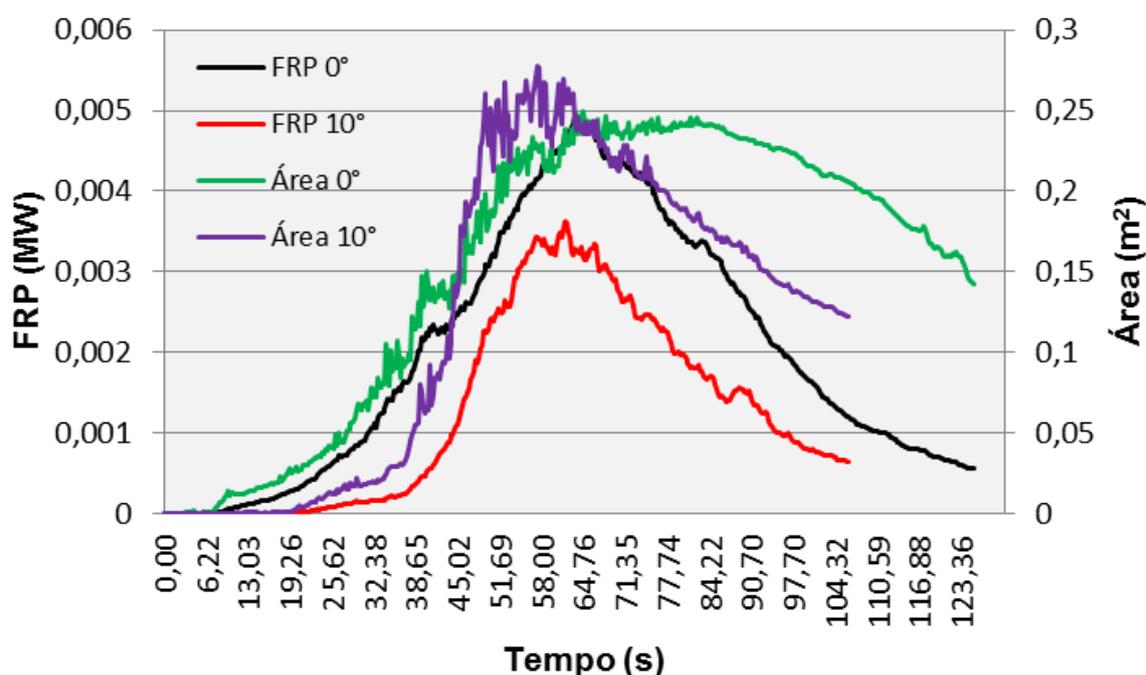


Figura 5.8 - Área queimada para as amostras de 100 gramas com diferentes ângulos de visada.

Contudo, em alguns casos a área queimada para uma mesma quantidade de biomassa foi maior em um ângulo mais oblíquo, como demonstrado na **Figura 5.9**. 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.

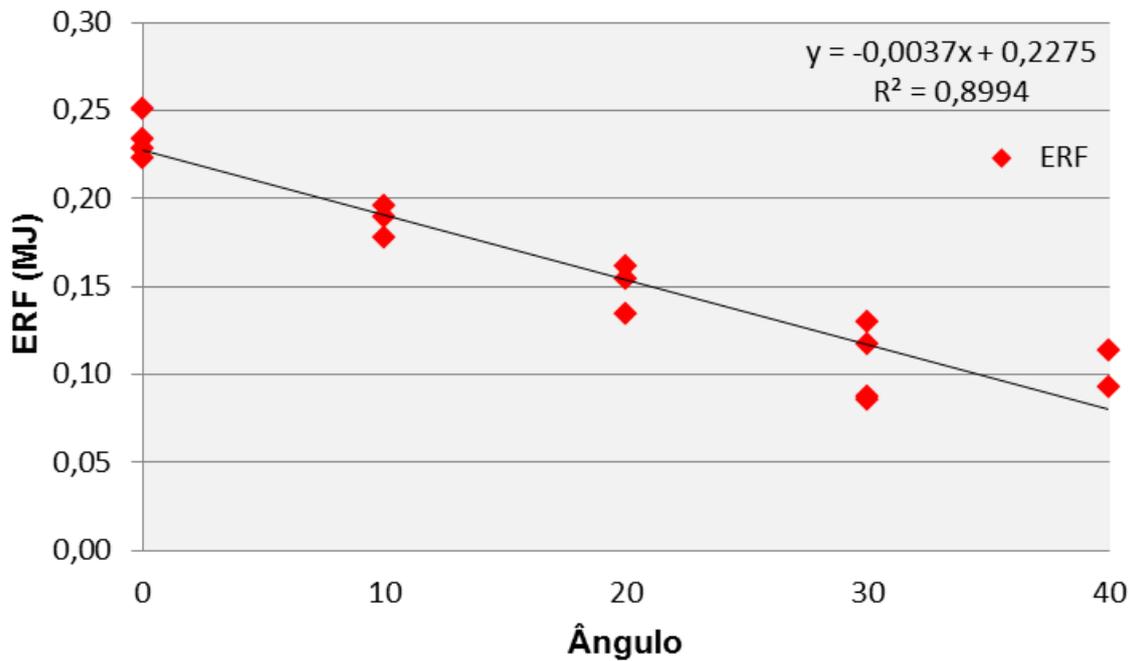
Assim como discutido anteriormente para as estimativas da FRP *forward* e *backward*, para uma comparação mais intensa entre a FRP e a área queimada com diferentes

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.



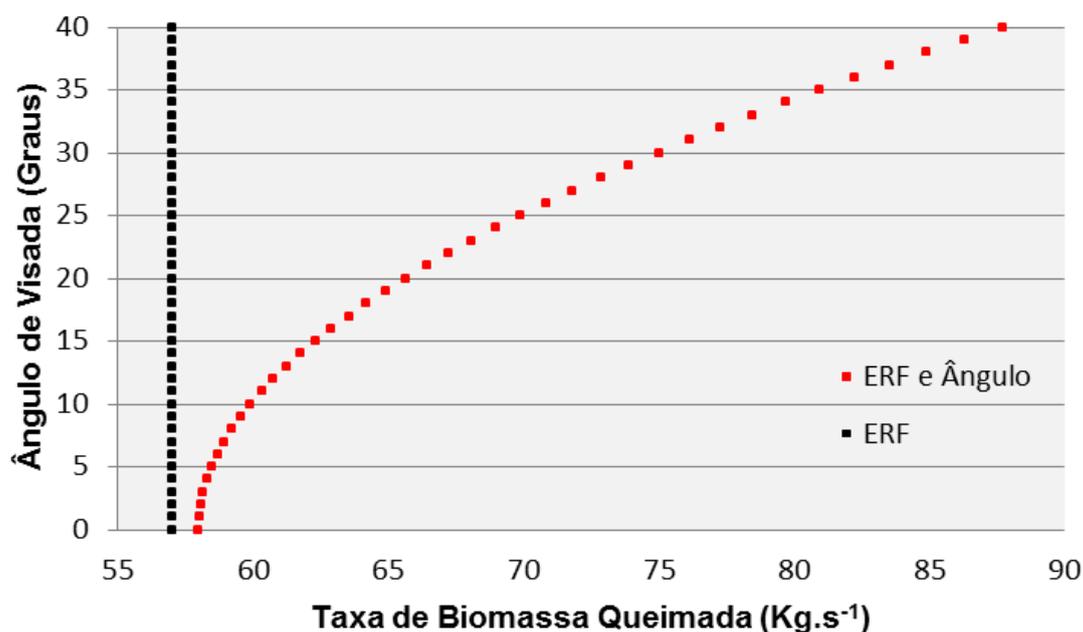
**Figura 5.9** - Estimativas da FRP e da área queimada para duas amostras, suma no nadir e outra 10 graus.

Em relação à FRE, os valores tendem a cair linearmente de acordo com o aumento do ângulo de visada, como no exemplo apresentado na **Figura 5.10**, que compara as estimativas da FRE para as amostras de 150 gramas nos diferentes ângulos de visada analisados. Ressalta-se que os valores considerados *outliers* foram removidos da **Figura 5.10**. Com isso, a determinação do coeficiente de biomassa queimada para a cana-de-açúcar considerou, além da FRE o ângulo de visada. O coeficiente apresentado na Equação 4.7 foi submetido ao teste estatístico t-Student e considerado significativo a 5% com coeficiente de determinação de 0,97.



**Figura 5.10** - Valores da FRE para as amostras de 150 gramas com diferentes ângulos de visada. Os valores considerados *outliers* foram removidos da dispersão.

A **Figura 5.11** apresenta uma comparação entre o coeficiente de biomassa queimada que considera o ângulo de visada (Equação 4.7) e o coeficiente de biomassa queimada que considera apenas a FRE das amostras no nadir, que seria de  $0,57 \text{ kg.MJ}^{-1}$ , também significativo a 5% de acordo com teste t-Student e com coeficiente de determinação de 0,97. No exemplo, foi determinado um valor de 100 MW para a FRP e área de  $1 \text{ m}^2$  ângulo de visada variando até 40 graus.



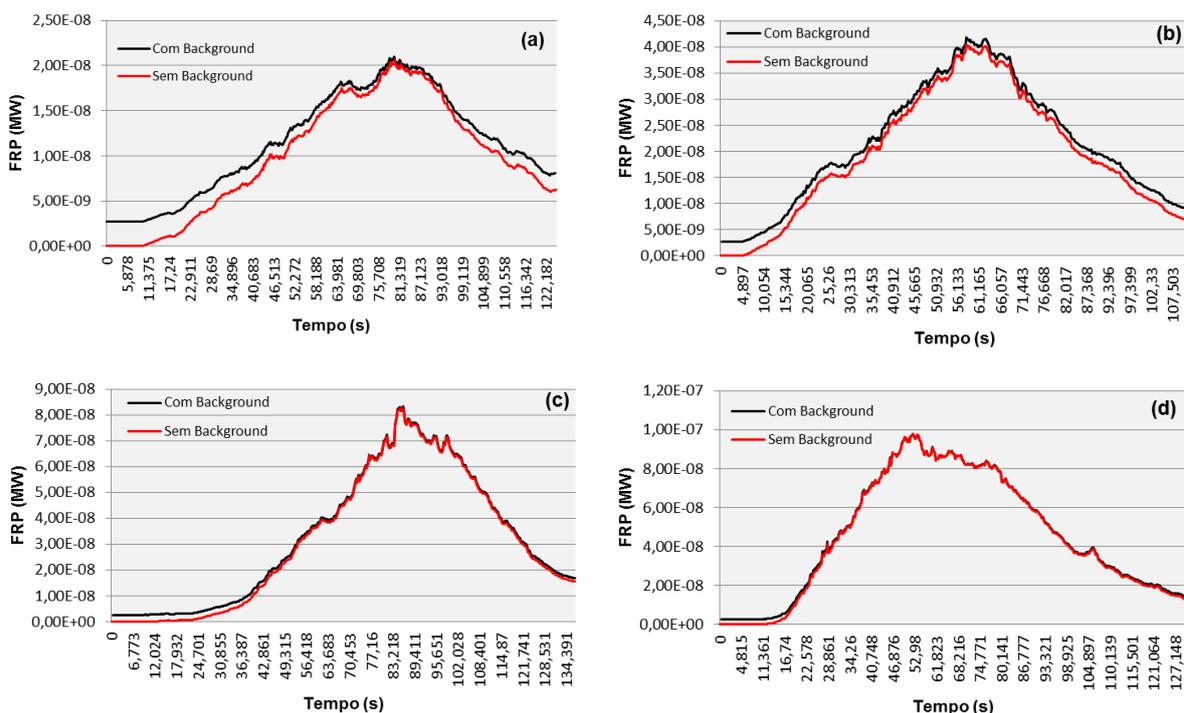
**Figura 5.11** - Comparação da taxa de biomassa queimada estimada para os dois coeficientes encontrados para diferentes ângulos de visada.

Analisando a **Figura 5.11**, ao se considerar apenas a FRE na determinação do coeficiente de biomassa queimada o valor da taxa de biomassa queimada é sempre fixo 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. Portanto, uma FRP estimada por um sensor orbital com valor de 100 MW a 30 graus, por exemplo, deveria ser superior a 100 MW. Considerando ainda o ângulo de visada de 30 graus, a taxa de biomassa queimada estimada com o coeficiente que considera o ângulo de visada seria  $75 \text{ kg.s}^{-1}$ , ou seja, 24% maior do que a taxa de biomassa queimada estimada com o coeficiente que considera somente a FRE, que, para chegar a esse mesmo valor de  $75 \text{ kg.s}^{-1}$  precisaria de uma FRP de 131,6 MW.

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 5.12** compara a FRP estimada para 4 amostras, com e sem o *background*, com as amostras 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 bem próximo a zero segundo, uma vez que se considerou a FRP estimada com a temperatura da palha da cana-de-açúcar nos *pixels* sem fogo valor 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.

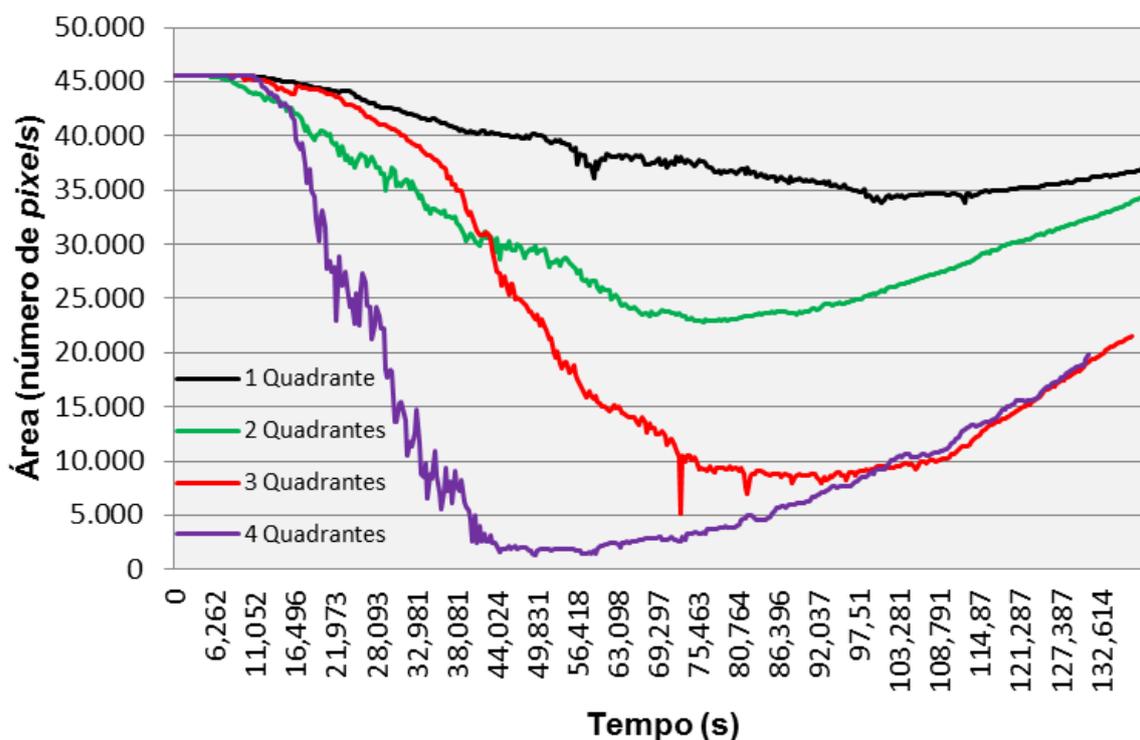
Para o *background* em 75% da área (**Figura 5.12(a)**), nota-se que sua influência é maior, principalmente nos segundos iniciais, correspondente ao espalhamento do fogo pela amostra, ainda, constata-se que até mesmo no momento de máxima emissão (cerca de 82 segundos após o início do fogo) ainda existe a contribuição do *background* na estimativa da FRP, e, conforme a combustão chega ao fim e a temperatura começa a diminuir e o *background* volta a aumentar a estimativa da FRP. Esse é o mesmo padrão encontrado para o *background* correspondente em 50% da área total (**Figura 5.12(b)**).



**Figura 5.12** – Comparação da FRP estimada para 4 amostras diferentes preenchendo, respectivamente, 25% (**5.12(a)**), 50% (**5.12(b)**), 75% (**5.12(c)**) e 100% (**5.12(d)**) da área composta pelos 4 quadrantes.

Para o *background* em 25% da área (**Figura 5.12(c)**), observa-se que a estimativa da FRP com o *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 5.12(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% dos *pixels* da área analisada estavam com temperatura menor que 80° C, como será abordado em seguida.

Em relação à contribuição do *background* na área queimada, a **Figura 5.13** apresenta o número total de *pixels* considerados como *background* ao longo do tempo para as mesmas amostras presentes na **Figura 5.12**. Nos segundos iniciais, todas as amostras apresentam o mesmo número de *pixels* considerados como *background*, 45.548 *pixels*, que correspondem à área total dos 4 quadrantes. Conforme o fogo se espalha sobre as amostras, o número de *pixels* 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.



**Figura 5.13** – Número total de *pixels* considerados como *background* para as amostras apresentadas das na **Figura 5.12**.

Quanto maior a quantidade de *background*, maior foi a diferença na estimativa da FRE. A **Tabela 5.2** apresenta o incremento na FRE para cada amostra analisada ao se adicionar os *pixels* considerados como *background* na estimativa da FRP. Para o *background* em 75% da área, a FRE das amostras aumentou em média 31%, com o *background* em 50% da área a FRE aumentou em média 13%, em 25 % da área como *background* a FRE foi acrescida em média 4% e com as amostras preenchendo totalmente a área dos 4 quadrantes a FRE foi, em média, 1,8% maior.

**Tabela 5.2** – Incremento na FRE ocasionado pelo *background* para as amostras analisadas com e sem o *background*.

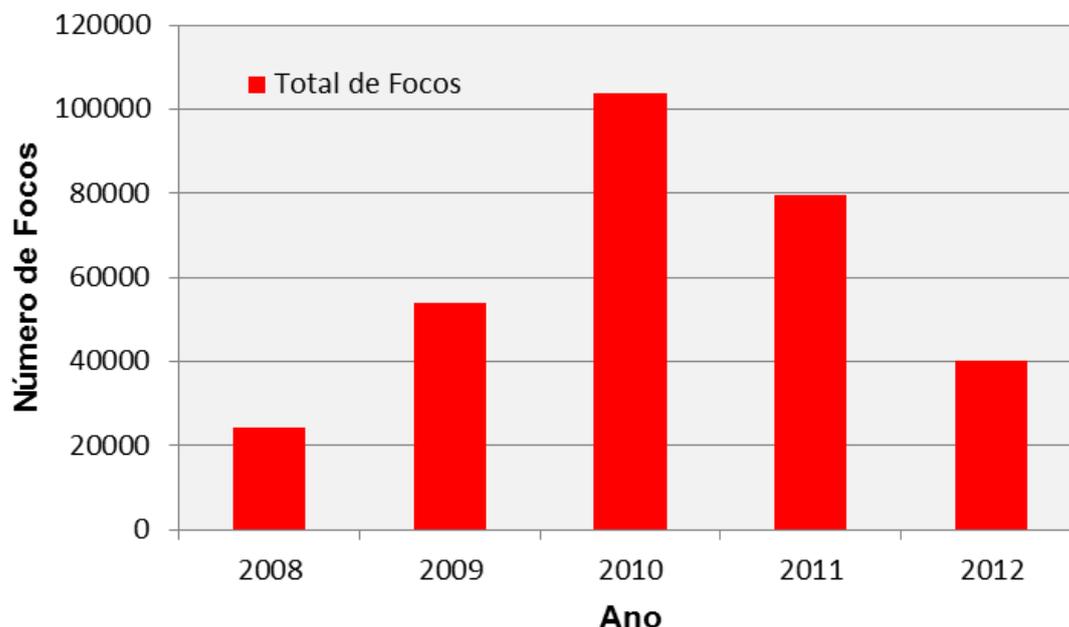
<b>Área preenchida pelas amostras (%)</b>	<b>Incremento na FRE (%)</b>
25	28,71
25	31,04
25	26,41
25	31,36
25	33,45
50	13,41
50	9,46
50	17,28
75	4,17
75	4,52
75	3,79
75	4,71
100	1,73
100	1,32
100	2,25
100	1,32
100	2,77

Ao se considerar as queimadas em ambiente natural o *background* pode ter efeitos ainda maiores na estimativa da FRP, pois no 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.

## **5.2. Distribuição dos focos de queimada e estimativa de biomassa queimada para o Estado de São Paulo**

A **Figura 5.14** apresenta o total de focos de queimada detectados nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo para cada ano analisado. Nota-se primeiramente um total de focos de queimada bem abaixo dos demais totais anuais para 2008, o que se explica pelo fato do sensor SEVIRI a bordo do METEOSAT ter entrado em

funcionamento a partir de abril de 2008, e ser este o sensor que mais identificou focos de queimada em áreas de cana-de-açúcar, como apresentado adiante.



**Figura 5.14** - Total anual de focos de queimada detectados em áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo de 2008 a 2012.

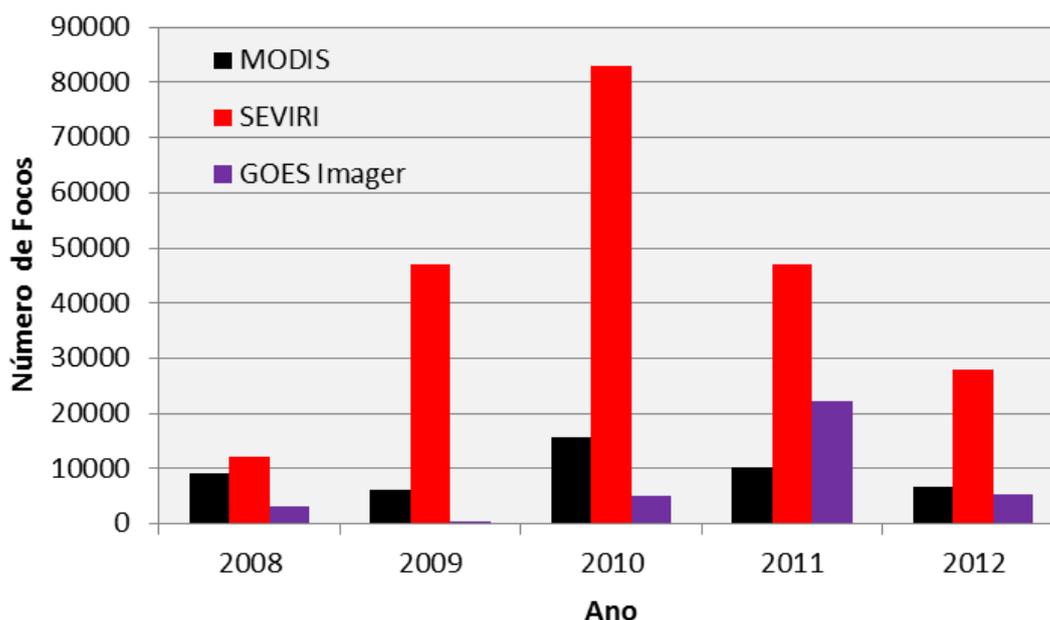
Em 2010, mais de 100 mil focos foram detectados, praticamente o dobro de focos detectados em 2009 e 30% maior que 2011. Esse resultado era esperado, uma vez que em 2010 houve a maior área colhida com queima desde 2006 (inpe, 2013), fato explicado pela seca ocorrida em 2010 nos meses da colheita da cana-de-açúcar, seca esta que favorece o aumento das queimadas (AGUIAR et al., 2011). Comparando 2009 e 2011 era esperado um número menor de focos em 2011, pois, de acordo com o mapeamento temático do projeto Canasat (INPE, 2013), a área colhida com queima foi 8% menor em 2011 quando comparada a 2009. Porém, o número de focos detectados em 2011 foi aproximadamente 48% maior do que em 2009, visto que nesse ano o número de focos detectados pelo GOES *Imager* foi muito maior quando comparado aos demais anos, conforme a análise do total anual de focos por sensor apresentada a seguir.

Em 2012, ocorreu uma grande redução no número de focos, chegando a pouco mais de 40 mil, metade dos focos detectados em 2011, o que corresponde ao esperado, uma vez

que houve uma redução de 30% na área colhida com queima no Estado de São Paulo em 2012 em comparação com 2011 (INPE, 2013). Ainda, esse resultado pode ter como motivação o Protocolo Etanol Verde, pois o mesmo tem como uma das metas o fim de queimada para a colheita da cana-de-açúcar em São Paulo para 2014 em áreas com declividade menor que 12%.

A **Figura 5.15** apresenta o total de focos detectados por cada sensor em cada ano analisado nas áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo. Nota-se, em todos os anos, que o SEVIRI, apesar da resolução espacial ser mais grosseira entre os demais sensores abordados, foi o principal responsável pela detecção de focos, contabilizando no período de 5 anos cerca de 4,5 vezes mais focos que os identificados pelo MODIS, e quase 6 vezes mais que os detectados pelo GOES *Imager*. O algoritmo de detecção de focos de queimada do SEVIRI e sua resolução temporal de 15 minutos podem ser uma das explicações para esse alto número de focos detectados, pois o tempo necessário para o fogo para consumir um talhão de cana-de-açúcar com de cerca de 5 hectares é 10 a 15 minutos (MARINHO; KIRCHHOFF, 1991).

O MODIS, que possui uma resolução espacial mais fina do que os sensores a bordo dos satélites geoestacionários analisados, detectou ao longo dos 5 anos analisados 30% a mais de focos do que o GOES *Imager*, que, teoricamente teria que detectar mais focos do que o MODIS devido à sua menor resolução temporal, como ocorreu com o SEVIRI. Com uma revisita de 4 vezes por dia, o MODIS foi o sensor com o número de focos mais equivalente a área colhida com queima total mapeada do projeto Canasat (INPE, 2013), pois apresentou diminuição do número total de focos entre 2008 e 2009, e o maior número de focos detectados em 2010.



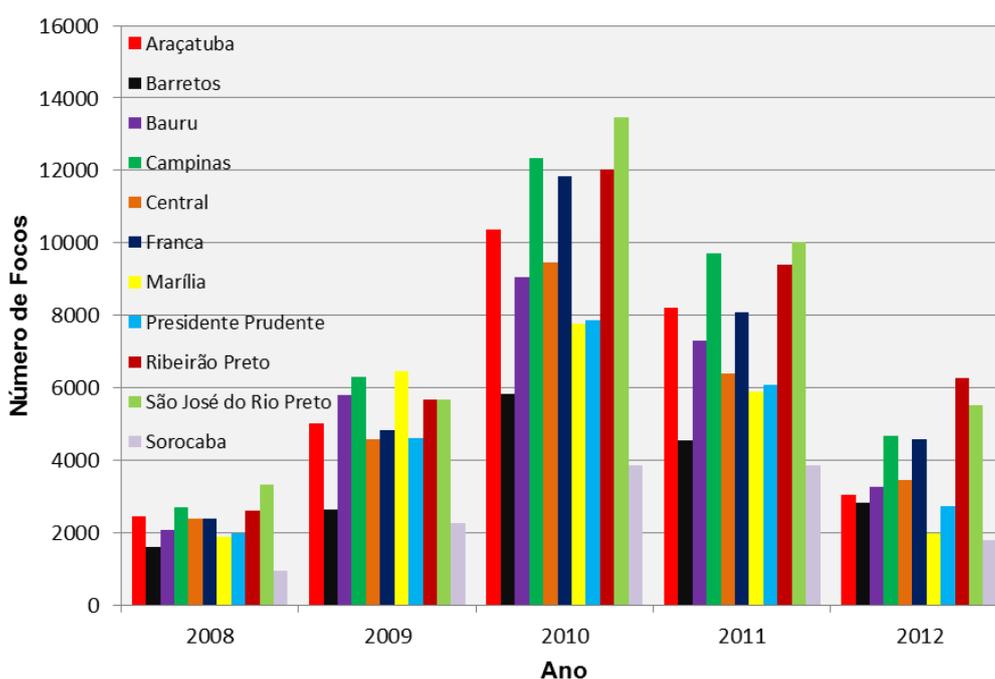
**Figura 5.15** - Total anual de focos de queimada detectados para cada sensor analisado em áreas de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo de 2008 a 2012.

O GOES *Imager* apresentou um padrão diferente dos demais sensores, pois poucos focos foram detectados de 2008 a 2010, com apenas 547 focos em 2009 e 5171 focos em 2010, ano em que era esperado a maior incidência de queimadas. O número de focos em 2010 ficou muito abaixo do SEVIRI, também em órbita geoestacionária, que detectou para esse mesmo ano mais de 83 mil focos. Esse resultado pode ter sido causado pelo algoritmo de detecção de focos de queimada do GOES *Imager* não ser eficiente na detecção de focos em áreas pequenas, como são o caso dos talhões de cana-de-açúcar submetidos à queimada pré-colheita. Além do algoritmo de detecção de focos, outros fatores que podem dificultar a detecção de focos de queimada por qualquer sensor são o horário divergente entre a queimada e a imagem, a presença de nuvens no momento do imageamento e, muitas vezes, a fumaça densa originada das próprias queimadas, impedindo a identificação dos focos sobre elas (FRANÇA, 2004).

Destaca-se ainda na **Figura 5.15** o elevado número de focos detectados pelo GOES *Imager* em 2011 (22.142 focos), sendo que o número de focos foi mais que o dobro da soma de todos os outros anos para este sensor. Uma explicação para o ocorrido é o lançamento de GOES-15, atual GOES *West*, que começou a transmitir dados em

fevereiro de 2011, e teve seu algoritmo de detecção de focos de queimada modificado (NOAA, 2013).

Em relação às RAs do Estado de São Paulo (**Figura 3.3**), as regiões que apresentaram o maior número total de focos de queimada em áreas de cana-de-açúcar foram as de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Campinas (**Figura 5.16**), algumas das mais tradicionais RAs em cultivo da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Ressalta-se que a RA de São José do Rio Preto apresentou o maior número total anual de focos em 3 dos 5 anos analisados. Nota-se para todas as RAs com a presença do cultivo da cana-de-açúcar o maior total anual de focos em 2010, ano analisado que apresentou a maior área colhida com queima (INPE, 2013). Neste ano também foi verificado que a RA de São José do Rio Preto apresentou o maior número de focos detectados para uma única RA com mais de 13.400 focos.



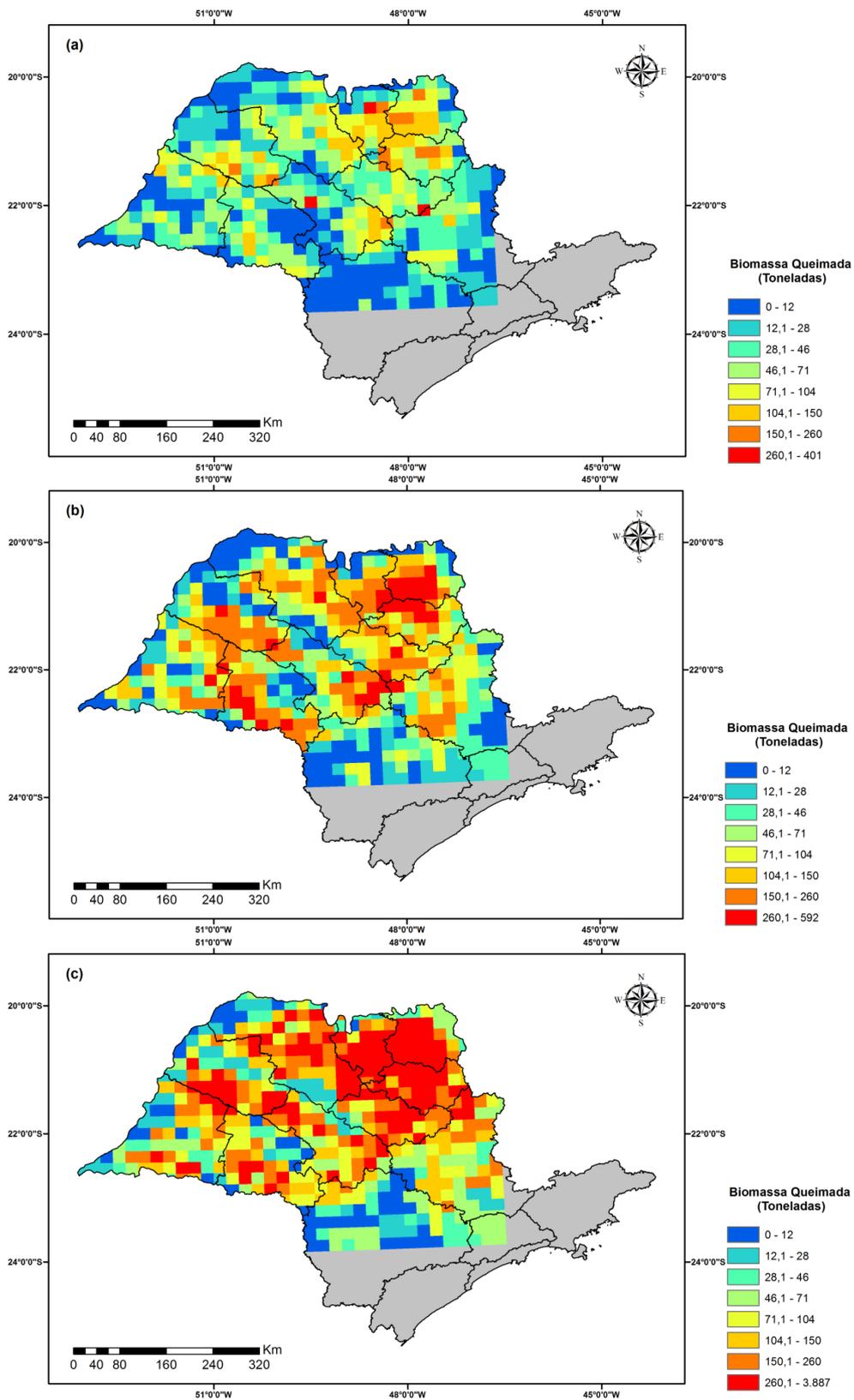
**Figura 5.16** – Total anual de focos de queimada detectados em áreas de cana-de-açúcar nas RAs do Estado de São Paulo entre 2008 e 2012.

Por outro lado, o menor número de focos anual em RAs que apresentam o cultivo da cana-de-açúcar foi encontrado, para todos os anos, na RA de Sorocaba. Entre 2008 e

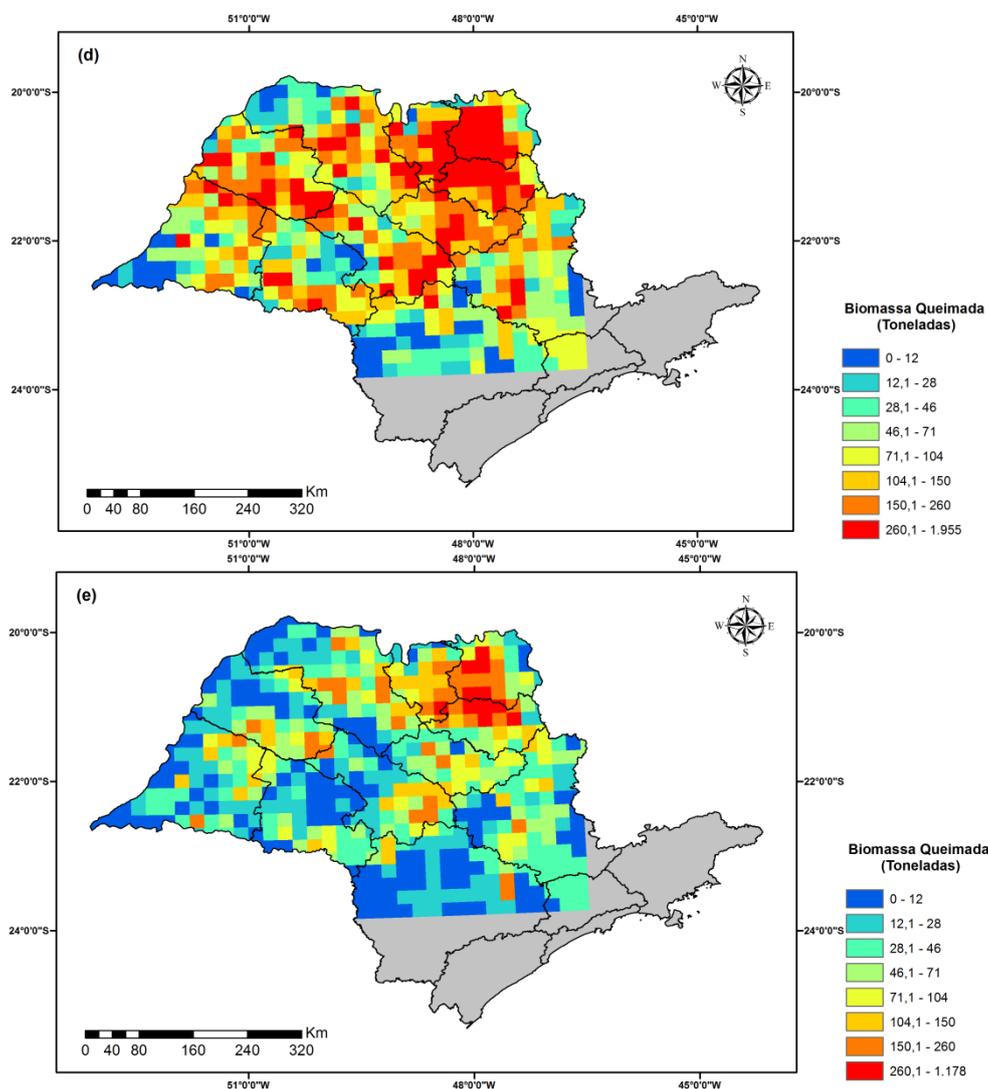
2012 a RA de Sorocaba apresentou um aumento de área cultivada de cana-de-açúcar de mais de 42 mil hectares, correspondentes a um aumento de 22% na área total cultivada na RA (INPE, 2013). Esse resultado pode ser um indicativo de que as novas áreas de cultivo tendem a adotar a colheita mecânica a fim de antecipar os prazos estabelecidos pelo Protocolo Etanol Verde.

As estimativas de biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo de 2008 a 2012 são apresentadas na **Figura 5.17**. Em cada ano, os valores de biomassa queimada foram somados para cada célula da grade de 20 km, multiplicados pela área de cada célula da grade (400 km<sup>2</sup>) e são apresentados em toneladas (t) divididos em 8 classes, com a última classe variando de 260,1 t até o valor máximo encontrado em cada ano, e a cor cinza representa as áreas do Estado de São Paulo onde não existe o cultivo da cana-de-açúcar. Os valores máximos nas estimativas anuais encontrados foram 401,8 t; 591,7 t; 3.887,2 t; 1.955,9 t e 1.170 t de 2008 a 2012, respectivamente.

Em 2008, a estimativa de biomassa queimada foi abaixo do esperado, novamente devido à ausência de dados do sensor SEVIRI de janeiro a abril desse ano. Apenas três células da grade apresentaram biomassa queimada superior a 260,1 t, com os maiores valores de biomassa queimada concentrados no Norte do Estado de São Paulo. Em 2009, a quantidade de células da grade regular com biomassa queimada superior a 260,1 t elevou-se, e, também, há uma concentração dos maiores valores no Norte de São Paulo. Porém, é possível perceber mais biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Oeste do Estado de São Paulo, um dos vetores de crescimento da cana-de-açúcar, em especial nas RAs de Marília e Presidente Prudente, que, entre 2008 e 2009, aumentaram a área colhida com queima de 160 mil para 179 mil hectares e de 97 mil para 144 mil hectares, respectivamente (INPE, 2013). Esse aumento expressivo em área colhida com queima na RA de Presidente Prudente também foi verificado nas estimativas obtidas, uma vez que em 2008 a biomassa queimada total nessa RA foi de 2.190,12 t e em 2009 a estimativa foi de 5.268,64 t (**Figura 5.18**).

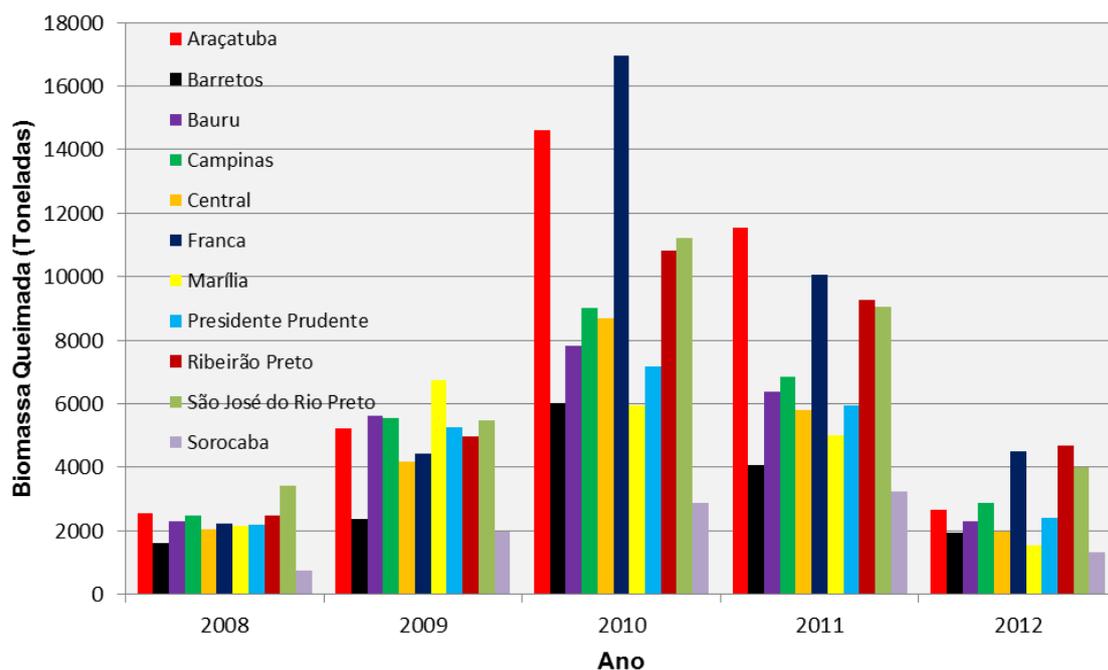


**Figura 5.17** – Estimativas de biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em 2008 (a), 2009 (b), 2010 (c), 2011 (d) e 2012 (e). (Continua)



**Figura 5.1.7 – Conclusão.**

Em 2010, as estimativas de biomassa queimada foram as maiores encontradas com o valor máximo observado em apenas uma única célula da grade regular maior que 3.887 t, sendo somente a RA de Franca responsável por aproximadamente 17 mil t de biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar (**Figura 5.18**). Ainda, merece destaque a RA de Araçatuba, também um vetor de crescimento da cana-de-açúcar no Oeste, que em 2010 apresentou área colhida com queima de mais de 217 mil hectares (INPE, 2013) e biomassa queimada total de quase 15 mil t.



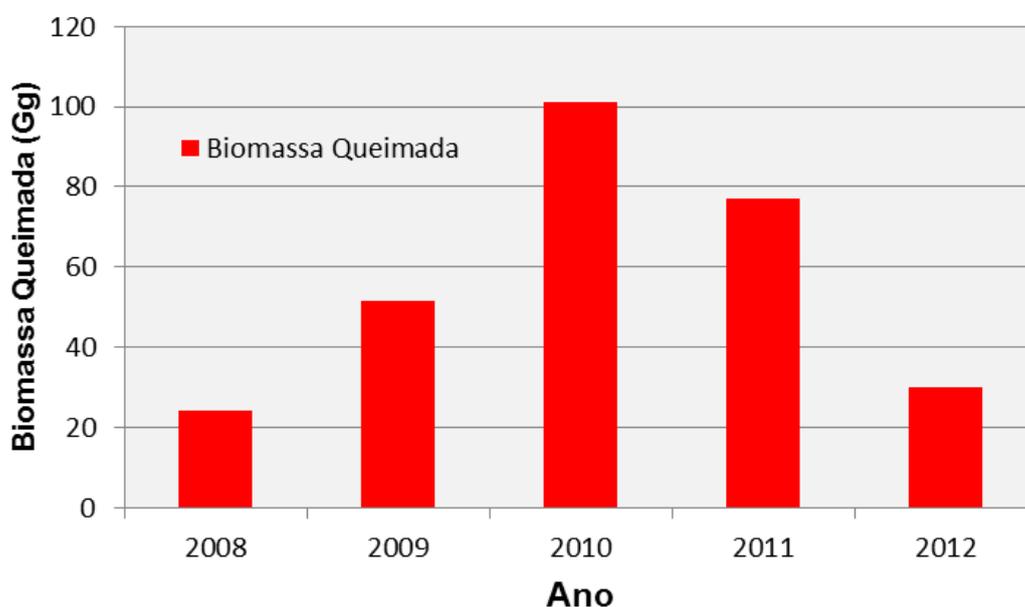
**Figura 5.18** - Biomassa queimada anual em toneladas para as RAs do Estado de São Paulo nos anos de 2008 a 2012.

Para 2011, as estimativas obtidas foram altas, somente menores que o ano de 2010 devido ao maior número de focos detectados pelo GOES *Imager* ao comparar seu desempenho aos demais anos analisados. A única exceção foi a RA de Marília, que apresentou um número menor de focos detectados em 2011 quando comparado a 2009 (**Figura 5.16**), porém a biomassa queimada em 2011 foi maior. Uma explicação para a exceção é que, apesar do menor número de focos em 2011, os focos detectados nesse ano foram mais intensos, com uma maior FRP associada a eles e, portanto, maior biomassa queimada.

Já em 2012, as estimativas de biomassa queimada total anual e para todas as RAs foi menor do que as estimativas em 2009, 2010 e 2011, sendo a única exceção a RA de Franca, com 4.412,59 t em 2009 e 4.509,22 t em 2011, que apresentou um padrão diferente das demais RAs, com um aumento de focos em 2012 quando comparado a 2011. Em 2012, com o SEVIRI em pleno funcionamento e o GOES *Imager* detectando os focos com seu novo algoritmo era esperado um número de focos e de biomassa

queimada superior ao encontrado, com isso, o resultado obtido mostra que a biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar está diminuindo.

Conforme discutido acima e analisando a biomassa queimada total anual para todo o Estado de São Paulo, a queda entre 2009 e 2012 foi acentuada, conforme a **Figura 5.19**, que apresenta as estimativas do total anual de biomassa queimada de 2008 a 2012 em Gigagramas (Gg). Para essa comparação, não foi utilizado o ano de 2008, pois, como abordado anteriormente, o sensor que mais detectou focos em áreas de cana-de-açúcar não estava em pleno funcionamento.



**Figura 5.19** - Total anual de biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo de 2008 a 2012.

Comparando 2009 e 2012, apesar do aumento encontrado em 2010 e 2011 devido, respectivamente, à seca e ao maior número de focos detectado, a biomassa queimada total anual diminuiu mais de 40%, passando de 51,73 Gg para 30,15 Gg, um indicativo de que a tendência atual dos novos canaviais é adotar a colheita mecânica e a conversão nos canaviais mais antigos da colheita com queima para a colheita mecânica.



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados encontrados no experimento de combustão em pequena escala permitiram determinar a influência do ângulo de visada e do *background* na 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 40° para uma mesma quantidade de biomassa.

Em relação à influência do *background* verificou-se que quanto maior a quantidade de *background* maior será a diferença nas estimativas, portanto o *background* pode inserir erros significativos na FRP, visto que o aumento da área de *background* introduziu um erro médio de até 31% nas estimativas. Esse erro pode ser ainda maior, pois a temperatura do *background* 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.

Em referência ao coeficiente de biomassa queimada, a inclusão do ângulo de visada na mesma mostrou ser apropriada, pois com o aumento do ângulo de visada a FRP é menor, e o coeficiente de biomassa queimada apresentado tenta corrigir esse fator.

O SEVIRI, apesar da resolução espacial mais grosseira entre os sensores abordados, mostrou-se como o mais eficiente para a detecção de focos de queimada em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, chegando a detectar ao longo dos 5 anos analisados 4,5 vezes mais focos que o MODIS e 6 vezes mais focos que o GOES *Imager*, fato que deve ser atribuído à sua resolução temporal de 15 minutos. A partir de 2011 espera-se que o GOES *Imager* passe a contribuir mais significativamente para a detecção de focos de queimada em áreas de cana-de-açúcar, visto as mudanças inseridas em seu algoritmo de detecção. Também, não se pode deixar de considerar o MODIS, que possui a melhor resolução espacial entre os sensores analisados e, como descrito na literatura, apresenta as melhores estimativas de FRP quando comparadas a dados campo.

Novas metodologias aplicadas ao monitoramento de queimadas podem ser desenvolvidas integrando-se dados de sensores a bordo de satélites de órbita

geoestacionária (maior repetitividade) com dados de sensores a bordo de satélites de órbita polar (resolução espacial mais fina), o que parece ser o caminho mais correto para a detecção de focos de queimada e melhores estimativas de FRP e biomassa queimada em áreas de queimada pré-colheita da cana-de-açúcar. As vantagens de cada tipo de sistema sensor devem ser aproveitadas, criando-se um sistema de monitoramento de focos de queimada mais preciso.

Quanto às estimativas de biomassa queimada, percebe-se em 2012 uma queda significativa na biomassa queimada pela colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, e a tendência é que nos anos seguintes essa queda se acentue ainda mais, pois a pressão das instituições governamentais e da própria sociedade pelo fim das queimadas na colheita da cana-de-açúcar é grande, contudo deve-se considerar que as mesmas dificilmente acabarão por completo, pois longos períodos de seca, como ocorrido em 2010, e até mesmo acidentes ou queimadas não originadas pelo homem são de difícil controle pelos órgãos responsáveis pela verificação do Protocolo Etanol Verde. Espera-se que a quantificação da redução da biomassa queimada pela queimada pré-colheita da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo possa servir de exemplo para outros Estados que ainda não possuem a metas para reduzir a queimada pré-colheita.

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 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 determinar a quantidade de biomassa a fim de estimar as emissões provenientes da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A. **Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do sensor MODIS. 2007.** 103 p. (INPE-14803-TDI/1246). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.11.18.56>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F.; ADAMI, M.; MELLO, M. P. Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo, Brazil. **Remote Sensing**, v.3, n.12, p. 2682-2703, 2011.

ANDREAE, M. O. Biomass burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: levine, J. S. (Ed.). **Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications**, The MIT Press, Cambridge, MA, p. 2-21, 1991.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochemical Cycles**, n. 15, v.4, p. 955-966, 10.1029/2000GB001382, 2001.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: Goldammer, J.G. (Ed.) **Fire in the tropical biota**. New York: Springer-Verlag, 1990. Cap. 6, p. 82-105.

DOZIER, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, p. 221-229, 1981.

ECKMAN, T. C.; ROBERTS, D. A.; STILL, C. J. Using multiple endmember spectral mixture analysis to retrieve subpixel fire properties from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.10, p. 3773-3783, 2008.

ECKMAN, T. C.; STILL, C. J.; ROBERTS, D. A.; MICHAELSEN, J. C. variations in subpixel fire properties with season and land cover in southern africa. **Earth Interactions**, v.4, n.6, p. 1-29, 2010.

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

FRANÇA, D. A.; 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. Pre-harvest sugarcane burning: determination of emission factors through laboratory measurements. **Atmosphere**, v. 3, n. 1, p. 164-180, 2012.

FRANÇA, D. A. **Emissões associadas à queima da palha da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e seus impactos na qualidade do ar**. 2013. 143 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.17.43-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E5M4B8>>. Acesso em: 06 jan. 2014.

FREEBORN, P.H.; WOOSTER, M.J.; HAO, W.M.; RYAN, C.A.; NORDGREN, B.L.; BAKER, S.P.; ICHOKU, C. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D1, D01102, 10.1029/2007JD008489, 2008.

FREEBORN, P. H.; WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G. Addressing the spatiotemporal sampling design of MODIS to provide estimates of the fire radiative energy emitted from Africa. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 475–498, 2011.

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. 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**, v.7, n. 01, p. 8525-8569, 2007.

GIGLIO, L.; KENDALL, J.; MACK, R. A multi-year active fire dataset for the tropics derived from the TRMM VIRS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 22, p. 4505-4525, 2003.

GIGLIO, L. **MODIS collection 4 active fire product user's guide**. Version 2.2, 2005. Disponível em: <[maps.geog.umd.edu/products/MODIS\\_Fire\\_Users\\_Guide\\_2.2.pdf](http://maps.geog.umd.edu/products/MODIS_Fire_Users_Guide_2.2.pdf)>. Acesso em: 26/10/2013.

GIGLIO, L.; VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P.S. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 957–974, 2006.

HANTSON, S.; PADILLA, M.; CORTI, D.; CHUVIECO, E. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. **Remote Sensing of Environment**, v.131, n.1, p. 152-159, 2013.

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005.

ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; WOOSTER, M.; REMER, L. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2950-2962, 2008.

ICHOKU, C.; KAHN, R.; CHIN, M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling. **Atmospheric Research**, v.111, p. 1-28, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR). **Canasat** - Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. Disponível em:  
<<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>>. Acesso em: 22 Ago. 2013.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 2, p. 244–262, 2002.

KAISER, J. W.; HEIL, A.; ANDREAE, M. O.; BENEDETTI, A.; CHUBAROVA, N.; JONES, L.; MORCRETTE, J. J.; RAZINGER, M.; SCHULTZ, M. G.; SUTTIE, M.; VAN DER WERF, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. **Biogeosciences**, v.9, n.1, p. 527-554, 2012.

KAUFMAN, Y. J.; TUCKER, C. J.; FUNG, I. Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D7, p. 9927-9939, 1990.

KAUFMAN, Y. J.; REMER, L.; OTTMAR, R.; WARD, D.; RONG-R, L.; KLEIDMAN, R.; FRASER, R.; FLYNN, L.; MCDUGAL, D.; SHELTON, G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: LEVINE, J. (Ed.). **Global biomass burning**, Maryland: MIT Press, p. 685-696, 1996.

KOLTUNOV, A.; USTIN, S. L.; PRINS, E. M. On timeliness and accuracy of wildfire detection by the GOES WF-ABBA algorithm over California during the 2006 fire season. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 194-209, 2012.

LAUK, C.; ERB, K. H. Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes. **Ecological Economics**, v.69, n.2, p. 301-309, 2009.

MANUAL DA FLIR. Disponível em: <http://www.flir.com/BR/>. Acesso em 20 jan. 2013.

MARINHO, E. V. A.; KIRCHHOFF, V. W. J. H. Projeto fogo: um experimento para avaliar efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na baixa atmosfera. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.9, p.107-119. 1991.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS)**. Disponível em [http://www.class.ngdc.noaa.gov/data\\_available/goes/index.html](http://www.class.ngdc.noaa.gov/data_available/goes/index.html). Acesso em: 21 Dez. 2013.

PAUGAM, R.; WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G. 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**, v. 51, n.6, p. 3385-3399, 2013.

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.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; LONGO, K. M. Monitoring the transport of biomass burning emission in South America. **Atmospheric Pollution Research**, v.2, p. 247-254, 2011.

PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; SILVA, F. B.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; FREITAS, S. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; BREUNIG, F. M.; VIANA, D. R.

Determinação e modelagem da taxa de consumo de biomassa queimada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, p. 13-22, 2012.

PEREIRA, G. **Estimativa e assimilação das emissões de gases traços e aerossóis de queimadas em modelos de química atmosférica**. 2013. 124p. (sid.inpe.br/mct-m19/2013/11.25.18.36-TDI).Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3F9T392>>. Acesso em: 09 jan. 2014.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Revista Saúde Pública**, v. 42, n. 2. p. 370-376, 2008.

RIGGAN, P.; TISSELL, R.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J.; PEREIRA, J.; MIRANDA, H.; CAMPOS, T.; HIGGINS, R. Remote measurement of energy and carbon flux from wild-fires in Brazil. **Ecological Application**, n.14, v.03, p. 855–872, 2004.

ROBERTS, G.; WOOSTER, M. J.; PERRY, G. L. W. ; DRAKE, N. ; REBELO, L.-M.; DIPOTSO, F. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D21, p. 1-20, 2005.

ROBERTS, G.; WOOSTER, M. Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 4, p. 1200–1218, 2008.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v.2, n.1, p. 1057–1076, 2010.

SANTOS, D.; BAHIA, V. G.; TEIXEIRA, W. G. Queimadas e erosão do solo. *Revista Informe Agropecuário*, v. 16, n. 176, p. 72-88, 1992.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMA-SP). **Eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar**. 2009. Disponível em:

<http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/default.aspx?idPagina=123>. Acesso em: 03 nov. 2013.

SEILER, W.; CRUTZEN, P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. **Climate Change**, v. 2, n. 03, p. 207–248, 1980.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO, A. F. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n.1, p. 3423–3441, 2006.

VERMOTE, E.; ELLICOTT, E.; DUBOVIK, O.; LAPIONOK, T.; CHIN, M.; GIGLIO, L.; ROBERTS, G.J. An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power. **Journal of Geophysical Research**, v.114, n.D18, p. 1984-2012, 2009.

WOOSTER, M. J. Small-scale experimental testing of fire radiative energy for quantifying mass combusted in natural vegetation fires. **Geophysical Research Letters**, v.29, n.21, p. 231-234, 2002.

WOOSTER, M. J.; ZHUKOV, B.; OERTEL, D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v.86, n.1, p. 83-107, 2003.

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

WOOSTER, M. J.; FREEBORN, P. H.; ARCHIBALD, S.; OPPENHEIMER, C.; ROBERTS, G. J.; SMITH, T. E. L.; GOVENDER, N.; BURTON, M.; 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 smouldering combustion in African savannahs. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.11, n.22, p. 11591-11615, 2011.

XU, W.; WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; 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**, v.114, n.9, p. 1876-1895, 2010.

ZHANG, X.; KONDRAGUNTA, S. Temporal and spatial variability in biomass burned areas across the USA derived from the GOES fire product. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.6, p.2886-2897, 2008.