

Modelagem da Contribuição do Cerrado sobre as Emissões Brasileiras de Material Particulado Fino ($PM_{2,5 \mu m}$) Associadas à Queima de Biomassa

Modelling the Contribution of the Cerrado Fires to the Brazilian Emissions of Fine Particulate Matter ($PM_{2,5 \mu m}$) Associated with Biomass Burning

Guilherme Augusto Verola Mataveli¹, Maria Elisa Siqueira Silva², Gabriel Pereira³, Paula Resende Santos⁴, Francielle da Silva Cardozo⁵, Suely Franco Siqueira Lima⁶, Daniela de Azeredo França⁷, Fernanda Batista Silva⁸

¹ Universidade de São Paulo, mataveli@usp.br

² Universidade de São Paulo, elisasiq@usp.br

³ Universidade de São João del-Rei, pereira@ufsj.edu.br

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, paula.santos@inpe.br

⁵ Universidade de São João del-Rei, franciellecardozo@ufsj.edu.br

⁶ Universidade de São Paulo, suelyfrancosiqueira@usp.br

⁷ Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, INPE, daniela.franca@cptec.inpe.br

⁸ Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, INPE, fernanda.batista@cptec.inpe.br

Recebido (Received): 06/04/2018

Aceito (Accepted): 21/08/2018

Resumo: A queima de biomassa é um dos principais processos responsáveis pela emissão de gases traços e aerossóis, impactando, desta forma, o clima, a qualidade do ar e a saúde. Nesse contexto, é fundamental estimar o total queimado e sua respectiva emissão durante o processo de combustão. Dentre os aerossóis emitidos, destaca-se o material particulado com diâmetro menor que 2,5 micrometros ($PM_{2,5 \mu m}$), que é um fator de risco para a ocorrência de doenças respiratórias e interfere no balanço radiativo global. No Brasil, estudos apontam as queimadas associadas às mudanças no uso e cobertura da terra como a principal fonte de emissão para a atmosfera. Ainda, destaca-se o Cerrado, que desde 1970 sofre um intenso processo de mudança do uso e cobertura da terra. O presente estudo objetivou estimar a massa de $PM_{2,5 \mu m}$ emitida pela queima de biomassa no Brasil e a respectiva contribuição do Cerrado nacionalmente, além da variação espacial e temporal do $PM_{2,5 \mu m}$ no Cerrado, no período 2009-2015. Para isso, foram utilizados dados orbitais dos sensores MODIS e SEVIRI, considerados como entrada na abordagem 3BEM_FRP implementada na ferramenta PREP-CHEM-SRC. Os resultados mostram que, na média, foram emitidos anualmente 1,63 milhões de toneladas de $PM_{2,5 \mu m}$ pela queima de biomassa no Brasil, sendo 37 % do total originado no Cerrado. As emissões concentraram-se no norte do bioma, atual frente de expansão agrícola, enquanto que temporalmente concentraram-se em setembro. Ressalta-se que tais resultados credenciam estudos futuros objetivando analisar o impacto dessas emissões no clima e na saúde humana.

Palavras-Chave: Queimadas; Brasil; Savanas; Sensoriamento Remoto.

Abstract: Biomass burning is one the main sources of emission of trace gases and aerosols into the atmosphere, impacting over the Earth's climate, air quality and human health. Moreover, it is fundamental to estimate the burned biomass and its respective emission during the combustion process. Among the aerosols emitted, we can highlight the fine particulate matter with diameter of less than 2.5 micrometers ($PM_{2,5 \mu m}$), which is a risk factor for respiratory diseases and impacts on the global radiative budget. In Brazil, studies show that fires associated to land-use and land-cover change (LULCC) is one of the main sources of emissions to the atmosphere. Moreover, the Cerrado is highlighted, which is suffering an intense LULCC process since the 1970s. We aimed to estimate the mass of $PM_{2,5 \mu m}$ emitted from biomass burning in Brazil and the respective contribution of the Cerrado, as well as the spatial and temporal variability of $PM_{2,5 \mu m}$ in the Cerrado during the 2009-2015 period. To estimate the emissions, we used orbital data from MODIS and SEVIRI sensors as inputs in the 3BEM_FRP approach implemented in the PREP-CHEM-SRC tool. Results showed that, on average, 1.63 million tons of $PM_{2,5 \mu m}$ are annually emitted in Brazil, however, approximately 37 % of this amount is originated in the Cerrado. We have that emissions are concentrated in the North, the current agricultural expansion frontier in the biome, while temporally emissions are concentrated in September. Our results qualify future studies to analyze the impact of these emissions on climate and human health.

Keywords: Fires; Brazil; Savannas; Remote Sensing.

1. Introdução

As queimadas são uma das principais fontes de emissão de gases traços e aerossóis para a atmosfera, representando cerca de 70 % da biomassa queimada globalmente (van der WERF *et al.*, 2017). Estima-se que as queimadas são responsáveis por cerca de 36 % das emissões globais de aerossóis carbonáceos e 25 % do aumento global de dióxido de carbono (CO₂) desde a época pré-industrial (FORSTER *et al.*, 2007). Apesar de ser a espécie dominante emitida pela queima de biomassa, o CO₂ não é a única emitida, especialmente considerando que a combustão completa dificilmente é atingida na natureza, desta forma, na combustão incompleta outros gases e aerossóis são emitidos pela queima de biomassa, dentre eles vapor d'água (H₂O), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N₂O), material particulado fino (PM_{2,5 μm}) e material particulado grosso (PM_{10 μm}) (LEVINE, 1994).

Nesse contexto, pode-se afirmar que as emissões associadas à queima de biomassa têm impacto sobre a composição da atmosfera e a qualidade do ar (BOSSIOLI *et al.*, 2017, CHAN, 2017), além de impactarem sobre os processos de interação entre a biosfera e atmosfera, como os fluxos de carbono e a formação de nuvens (BERINGER *et al.*, 2003; ICHOKU *et al.*, 2016); além disso, deve-se considerar que o impacto de tais emissões ultrapassa a escala local devido ao transporte atmosférico (KAISER *et al.*, 2012). Ainda, cabe destacar o papel que as emissões associadas à queima de biomassa exercem sobre a saúde humana, em especial o material particulado. Estudos recentes apontam que o material particulado emitido pela queima de biomassa causa danos ao DNA humano e a morte de células pulmonares (ALVES *et al.*, 2017) e que globalmente em média 339 mil mortes são atribuídas todo ano às emissões de PM_{2,5 μm} por queimadas (JOHNSTON *et al.*, 2012). Portanto, é importante estimar a quantidade de PM_{2,5 μm} proveniente da queima de biomassa, sendo tal estimativa uma variável de entrada em modelos utilizados nos estudos de transporte atmosférico, da variabilidade e mudanças climáticas e do impacto da dispersão de poluentes na saúde humana.

Na escala global, cerca de 84 % das emissões associadas à queima de biomassa tem origem na região tropical do planeta, sendo que a formação vegetal dominante em que as mesmas ocorrem são as savanas (62 % do total global emitido) (van der WERF *et al.*, 2017). Assim como globalmente, as emissões ocorridas nas savanas brasileiras (bioma Cerrado) têm importante papel nas emissões nacionais, já que o bioma concentra mais de 70 % da área queimada que ocorre no Brasil anualmente (MOREIRA DE ARAÚJO *et al.*, 2012). Além de serem uma ocorrência natural no Cerrado e necessárias para a manutenção do bioma, as queimadas são amplamente empregadas no processo de expansão agrícola que ocorre no bioma desde a década de 1970, em que o fogo é utilizado para remover a vegetação natural e permitir a introdução de um novo uso da terra, tipicamente agricultura ou pecuária, bem como para fins agrícolas como a remoção de pragas (PIVELLO, 2011). Ainda, são poucos os estudos que quantificam a emissão pela queima de biomassa no Cerrado brasileiro, bem como sua participação em âmbito nacional.

Considerando a dinâmica das queimadas, sua extensão espacial, as dificuldades e os custos envolvidos em realizar medidas em campo, além da área que compreende o bioma Cerrado (mais de 2 milhões de km²), o estudo das queimadas no bioma tem sido amplamente desenvolvido com o uso do sensoriamento remoto (LIBONATI *et al.*, 2015; MOREIRA DE ARAÚJO e FERREIRA, 2015; NOGUEIRA *et al.*, 2017). Em relação às emissões, o método mais utilizado atualmente para estimá-las a partir de dados orbitais é derivado da Potência Radiativa do Fogo (FRP, do inglês *Fire Radiative Power*), uma medida discreta definida como a taxa com que a energia é emitida pelo fogo na forma de radiação eletromagnética e que é diretamente proporcional à biomassa queimada e às emissões (WOOSTER, 2002). Ainda, é possível atualmente estimar as emissões a partir da integração da FRP derivada de diversos sensores, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e o *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI), através de sub-rotinas como o *Brazilian Biomass Burning Emission Model with Fire Radiative Power* (3BEM_FRP), presente no sistema PREP-CHEM-SRC, uma ferramenta numérica desenvolvida para a estimativa e análise das emissões (PEREIRA *et al.*, 2009; LONGO *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2016).

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo estimar a quantidade de PM_{2,5 μm} emitido pela queima de biomassa proveniente do bioma Cerrado em relação ao total de PM_{2,5 μm} emitido nacionalmente, bem como analisar a variação espacial e temporal destas emissões no bioma Cerrado.

2. Área de Estudo

Localizado na região central do Brasil, o Cerrado (**Figura 1**) é o segundo maior bioma brasileiro, ocupando aproximadamente 23,92 % da área total do território nacional. O bioma abrange o Distrito Federal e os estados de Goiás, Tocantins, e parte dos estados da Bahia, Maranhão, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Piauí, São Paulo e Paraná (IBGE, 2010). Os principais tipos de vegetação do bioma Cerrado se diferenciam principalmente pela fisionomia (forma), fatores edáficos e da composição florística, e são classificados como: formações Florestais

(Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), Savânicas (Cerrado *stricto sensu*, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda) e Campestres (Campo sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre) (RIBEIRO e WALTER, 2008).

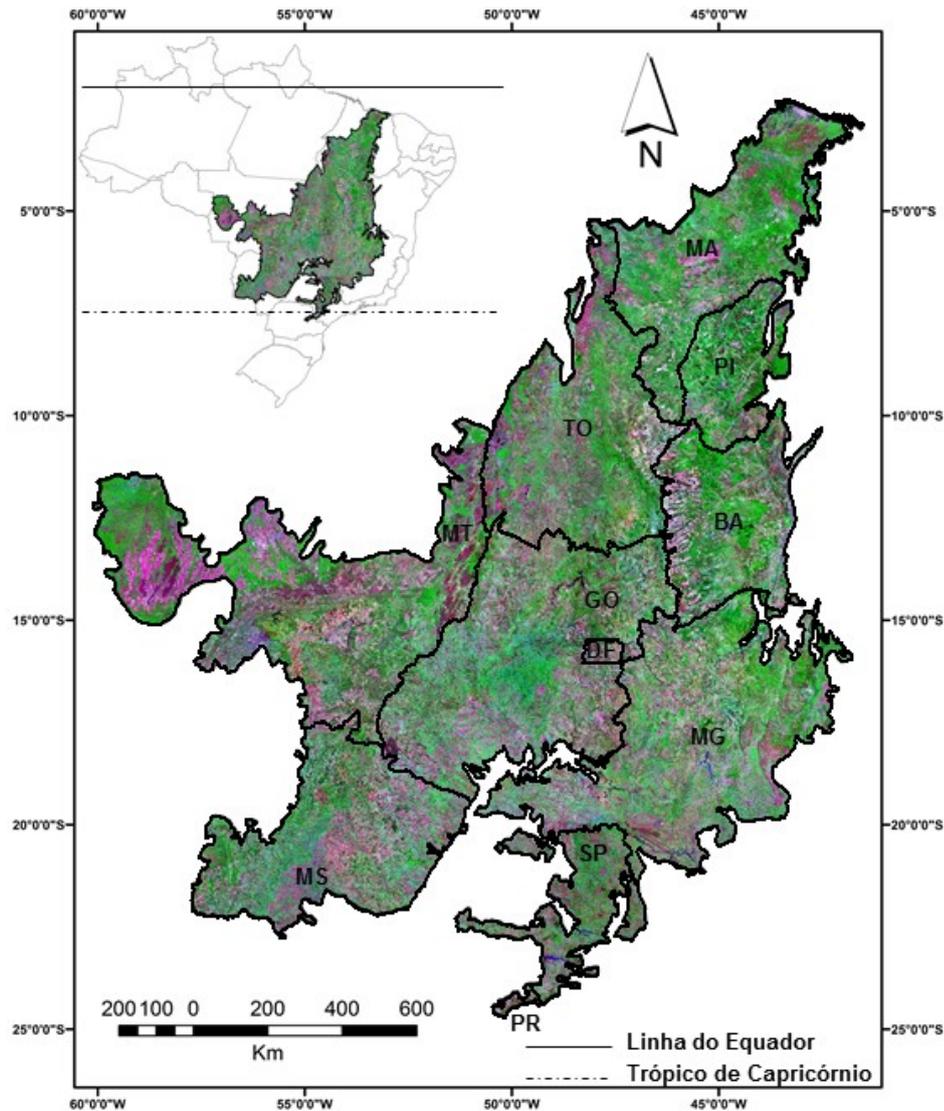


Figura 1: Localização do bioma Cerrado no território brasileiro. Mosaico de imagens ETM+/Landsat-7, composição colorida R5G4B3. Fonte: Autores (2018).

O clima do bioma é definido como Tropical Sazonal com temperaturas médias anuais que variam entre valores mínimos de 20°C a 22°C e valores máximos de 24°C a 26°C. Apesar de existir uma variação espacial dentro do bioma, no geral o Cerrado possui duas estações bem definidas: uma seca que se inicia em maio e se estende até setembro e outra chuvosa que vai de outubro a abril, como descrito por Mataveli *et al.* (2018). As precipitações anuais médias variam entre 1.200 mm e 1.600 mm, com registros pluviométricos que variam de 2.000 mm a 2.200 mm no limite com a floresta Amazônica e entre 600 mm e 800 mm na interface com a Caatinga (AB’SABER, 2003).

Durante o período de seca ocorrem os maiores registros de queimadas, pois os baixos níveis de umidade relativa do ar (38 % a 40 %) combinados ao elevado volume de biomassa seca contribuem para propagação e manutenção do fogo. Embora algumas espécies do Cerrado sejam adaptadas ao fogo, a ocupação antrópica mudou o regime das queimadas (extensão, frequência, intensidade e severidade) no bioma. Estudos sugerem que a recorrência de queimadas tem o potencial de mudar a fisionomia do Cerrado para campos abertos, tornando as gramíneas o principal componente do estrato herbáceo, o que resulta em um maior acúmulo de biomassa, e, conseqüentemente, maior frequência de queimadas com altas temperaturas, prejudicando a fauna e a flora e expondo o solo aos processos erosivos e de lixiviação (MIRANDA *et al.*, 2002).

Uma série de esforços de pesquisas e iniciativas de programas governamentais viabilizaram o uso agrícola do Cerrado a partir da década de 1970, que é considerado a atual fronteira de expansão agrícola do Brasil. A principal dificuldade enfrentada pela produção agrícola no Cerrado era a baixa fertilidade dos solos, em que predominam a

fração areia, seguida pela argila e o silte e são caracterizados por serem bastante ácidos com pH que pode variar de menos de 4 a até mais de 5 (COUTINHO, 1990). No entanto, os avanços das técnicas agrícolas para a correção de solos, como a calagem, possibilitaram a prática da agricultura no bioma. As constantes alterações na paisagem do bioma em função do modelo de ocupação baseado em monoculturas produtoras de *commodities* são responsáveis pela degradação dos ecossistemas, invasão de espécies exóticas e fragmentação de habitats no Cerrado (KLINK e MACHADO, 2005).

3. Materiais e Métodos

3.1. Produtos de fogo ativo utilizados

Os produtos *Thermal Anomalies and Fire Collection 6* - MOD14 e MYD14 são os produtos de fogo ativo derivados do sensor MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua, respectivamente, e juntos podem realizar até quatro aquisições diárias de um mesmo ponto da superfície terrestre (JUSTICE *et al.*, 2002). O algoritmo MODIS *Collection 6* utiliza as temperaturas de brilho estimadas nas bandas correspondentes às faixas espectrais do infravermelho médio e termal para detectar focos de calor com resolução espacial nominal de 1 km. A estimativa da FRP associada aos focos de calor detectados pelos produtos MOD14 e MYD14 baseia-se na abordagem proposta por Wooster *et al.* (2003).

Os satélites METEOSAT 8, 9, 10 e 11 operados pela *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) constituem a série *Meteosat Second Generation* (MSG) de satélites geoestacionários centrados sobre a Europa e a África. Os satélites desta série são equipados com o sensor SEVIRI, que possui resolução temporal de 15 minutos e fornece produtos com resolução espacial de cerca de 6 km para a América do Sul (WOOSTER *et al.*, 2015). O produto FRP-PIXEL, derivado do SEVIRI e fornecido desde abril de 2008, apresenta os *pixels* que contenham focos de calor detectados a partir das bandas espectrais posicionadas entre 3,9 μm e 11,0 μm a partir do algoritmo *Fire Thermal Anomaly* (FTA) (WOOSTER *et al.*, 2015). A FRP estimada para cada foco de calor detectado pelo FRP-PIXEL também é baseada no método proposto por Wooster *et al.* (2003).

3.2. Descrição do 3BEM_FRP e do PREP-CHEM-SRC

O pré-processador de emissões PREP-CHEM-SRC tem como objetivo gerar em grades regulares as emissões de poluentes atmosféricos provenientes da queima de biomassa, de áreas urbanas/industriais, fontes biogênicas e vulcânicas, do uso de biocombustíveis e de resíduos agrícolas com resolução espacial flexível e diversas projeções, para modelos de transporte regionais e globais (FREITAS *et al.*, 2011).

As estimativas de gases traços e aerossóis oriundos da queima de biomassa no PREP-CHEM-SRC podem ser geradas a partir da abordagem baseada na área queimada utilizando o *Brazilian Biomass Burning Emission Model* (3BEM) (LONGO *et al.*, 2010), operando com focos de calor detectados por sensores orbitais ou o *Global Fire Emissions Database* (GFED) (van der WERF *et al.*, 2010), ou através da abordagem baseada na assimilação da FRP pelo 3BEM_FRP (PEREIRA *et al.*, 2009). Estudos comparativos entre as diferentes versões do 3BEM e 3BEM_FRP mostram que a abordagem usando o 3BEM_FRP apresenta maior concordância com emissões estimadas a partir de inventários de área queimada baseados em imagens Landsat (CARDOZO *et al.* 2015). Outra vantagem do uso do 3BEM_FRP no PREP-CHEM-SRC consiste em ser possível assimilar dados de diferentes sensores, sejam sensores em órbita polar, como o MODIS, ou sensores em órbita geoestacionária, como o SEVIRI. Tal fato permite utilizar a melhor característica da resolução dos sensores para a estimativa das emissões, seja a espacial para os de órbita polar ou a temporal para os sensores em órbita geoestacionária.

3.3. Método para estimar as emissões de $PM_{2,5 \mu\text{m}}$

A **Figura 2** apresenta o fluxograma dos procedimentos utilizados para atingir os objetivos estabelecidos na presente pesquisa. As emissões de $PM_{2,5 \mu\text{m}}$ foram estimadas a partir da integração dos produtos de fogo ativo dos sensores MODIS e SEVIRI no 3BEM_FRP considerando uma grade regular de $0,18^\circ$. A FRP estimada pelos diferentes sensores ($\xi(lon, lat)$) em um determinado intervalo de tempo (t , em segundos) é agrupada em uma grade (FRP_{grid} , em MW), resultante da convolução de uma máscara $\eta(\gamma, k)$, de tamanho $M \times N$ (colunas x linhas) sobre os valores de FRP (**Equação 1**, PEREIRA *et al.*, 2016).

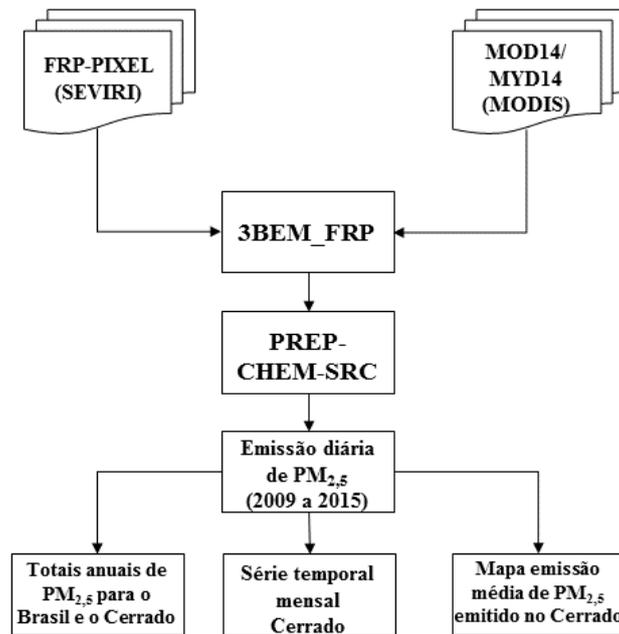


Figura 2: Fluxograma dos procedimentos usados no desenvolvimento do trabalho. Fonte: Autores (2018).

$$FRP_{grid(lon,lat,t)} = \sum_{\gamma=-a}^{\alpha} \sum_{\kappa=-b}^{\beta} \eta(\gamma, k)\xi(lon + \gamma, lat + \kappa, t) \quad (1)$$

Em seguida, com o valor da FRP integrada para cada intervalo de tempo em cada ponto da grade regular, foi estimada a Energia Radiativa do Fogo (FRE, do inglês *Fire Radiative Energy*), que é a energia emitida como radiação eletromagnética durante o ciclo de vida da queimada (WOOSTER, 2002) a partir da **Equação 2** (PEREIRA *et al.*, 2016), em que $FRE_{grid(lon,lat,t)}$ representa a FRE (MJ) em um determinado ponto da grade regular, FRP_n a FRP (MW) integrada a partir da **Equação 1** para cada tempo, e t o intervalo entre as observações (em segundos). Cabe ressaltar que caso a diferença entre os horários de aquisição entre os focos de calor seja maior que 4 horas o processo de integração é finalizado, iniciando-se novamente quando outro foco é detectado.

$$FRE_{grid(lon,lat,t)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1})(t_{n+1} - t_n) \quad (2)$$

A FRE é então utilizada para estimar a massa de um determinado gás ou aerossol emitido a partir da **Equação 3** (PEREIRA *et al.*, 2016):

$$M^{[\epsilon]} = FRE_{grid(lon,lat,t)} \omega EF^{[\epsilon]} \quad (3)$$

Em que $M^{[\epsilon]}$ representa a massa (kg) emitida de uma determinada espécie gasosa ou de aerossol, $FRE_{grid(lon,lat,t)}$ a estimativa da FRE (MJ) gerada no 3BEM_FRP, ω o coeficiente de consumo de biomassa, e $EF^{[\epsilon]}$ o fator de emissão de uma determinada espécie. Ressalta-se que no PREP-CHEM-SRC a queima de biomassa foi utilizada como única fonte de emissão, e que ambos os coeficientes apresentados na **Equação 3** estão determinados para os distintos usos da terra que existem na América do Sul.

A variável de saída do PREP-CHEM-SRC representa a emissão diária de uma série de espécies de gases traços e aerossóis derivados da queima de biomassa para toda a América do Sul. Em um primeiro momento, as emissões diárias de $PM_{2,5 \mu m}$ foram agrupadas para cada ano analisado e recortadas com os limites do Brasil e do Cerrado

delimitados pelo IBGE (2010), a fim de se estimar o total anual de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido no território brasileiro e no bioma. Ainda, as estimativas geradas para o Cerrado foram agrupadas mensalmente a fim de se determinar a distribuição sazonal das emissões de $PM_{2,5 \mu m}$ no bioma; ambos os processamentos descritos foram realizados no *Grid Analysis and Display System* (GrADS), uma ferramenta utilizada para acessar, manipular e visualizar dados. Em relação à distribuição espacial, foi estimada a média anual de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido pela queima de biomassa no Cerrado a partir dos mapas anuais do total de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido no bioma; tal processamento foi realizado no sistema de informações geográficas ArcGIS 10.3.

4. Resultados e Discussão

A série temporal do total mensal de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido pela queima de biomassa no Cerrado é apresentada na **Figura 3**. Ao analisar a **Figura 3**, com os valores totais mensais para o período 2009-2015, percebe-se que a emissão de $PM_{2,5 \mu m}$ em todo o Cerrado predomina no mês de setembro (média de 196 mil toneladas), seguido pelos valores de agosto (média de 147 mil toneladas), outubro (média de 98 mil toneladas), julho (média de 63 mil toneladas) e novembro (média de 31 mil toneladas). A concentração da emissão em agosto, setembro e outubro está fortemente relacionada com o clima do Cerrado, pois estes meses caracterizam o auge da estação seca devido aos meses acumulados de seca e o consequente déficit hídrico para a maioria do bioma, como demonstrado por Mataveli *et al.* (2018). O maior déficit anual de precipitação ocorre no mês de setembro, tornando a vegetação mais seca e, portanto, suscetível à queima. Durante a transição da estação seca para a chuvosa na área do bioma (outubro e novembro), as queimadas naturais costumam ocorrer devido à maior incidência de raios (RAMOS-NETO e PIVELLO, 2000). Os meses de agosto, setembro e outubro concentraram cerca de 73 % das emissões anuais de $PM_{2,5 \mu m}$ no Cerrado durante o período 2009-2015, corroborando com Moreira de Araújo e Ferreira (2015), que encontraram mais de 80 % da área queimada no Cerrado durante esses três meses para o período 2000-2012.

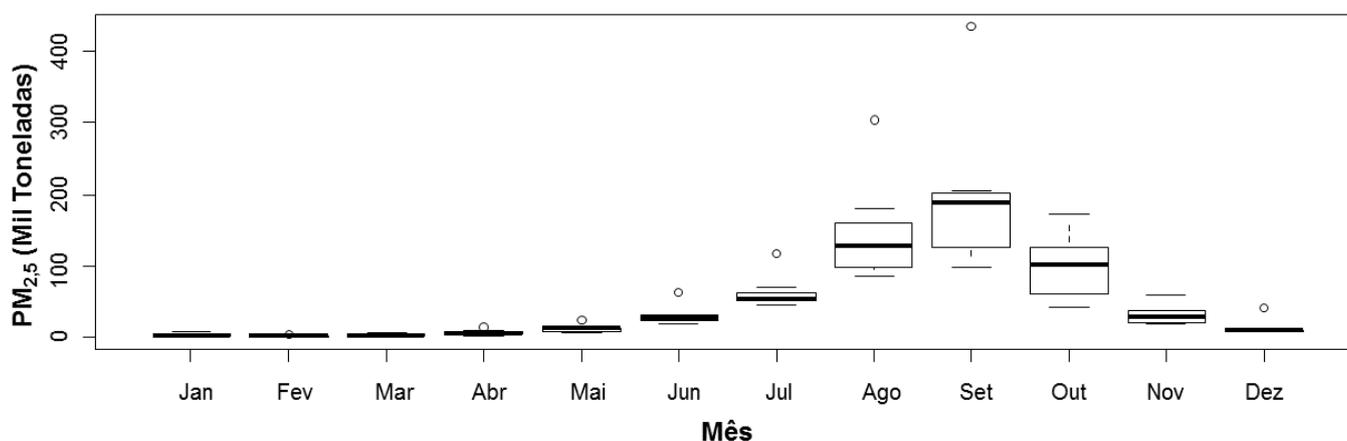


Figura 3: Boxplot apresentando a variação do total mensal de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido pela queima de biomassa na área coberta pelo bioma Cerrado durante o período 2009-2015. Fonte: Autores (2018).

No entanto, apesar de serem fortemente ligada ao clima, deve-se também considerar a ação antrópica como causa das queimadas. De acordo com Pivello (2011), o processo de mudança no uso e cobertura da terra no Cerrado geralmente se inicia com o uso do fogo para remover a vegetação natural, sendo, em seguida, as áreas desmatadas ocupadas por pastagens, agricultura de subsistência ou agricultura para produção de *commodities*. Ainda de acordo com a autora, mesmo após a conversão do uso e cobertura da terra, o fogo também é utilizado com a finalidade de estimular a rebrota da pastagem para alimentação do gado durante a estação seca, rotação de culturas agrícolas e eliminação de resíduos agrícolas. Cabe ainda ressaltar que o manejo da terra pode alterar o padrão apresentado na **Figura 3**, pois, de acordo com van der Werf *et al.* (2008), queimadas controladas podem ocorrer no início da estação seca para reduzir a degradação do solo e a ocorrência de queimadas fora de controle, ou, podem ocorrer no fim da estação seca para favorecer a rebrota da pastagem no decorrer da estação chuvosa.

Adicionalmente, na **Figura 3** é possível identificar *outliers*, ou seja, meses em que a emissão de $PM_{2,5 \mu m}$ no Cerrado foi muito acima da média, representados pelos círculos na figura. Todos os *outliers* identificados, como exceção do *outlier* encontrado em dezembro (ano de 2015), ocorreram no ano de 2010. O ano de 2010 foi um ano atípico climaticamente no Cerrado, pois a precipitação esteve abaixo da média durante toda a estação seca (MATAVELI *et al.*, 2018), o que causou um número acentuado de queimadas. Em 2010, o grande destaque dá-se ao mês de setembro, quando foram emitidas 435 mil toneladas de $PM_{2,5 \mu m}$ em um único mês, sendo esse valor maior do

que o total de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido nos anos de 2009 e 2013 no Cerrado. Os totais anuais de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido no Cerrado e em todo o território brasileiro durante o período 2009-2015 são apresentados na **Figura 4**.

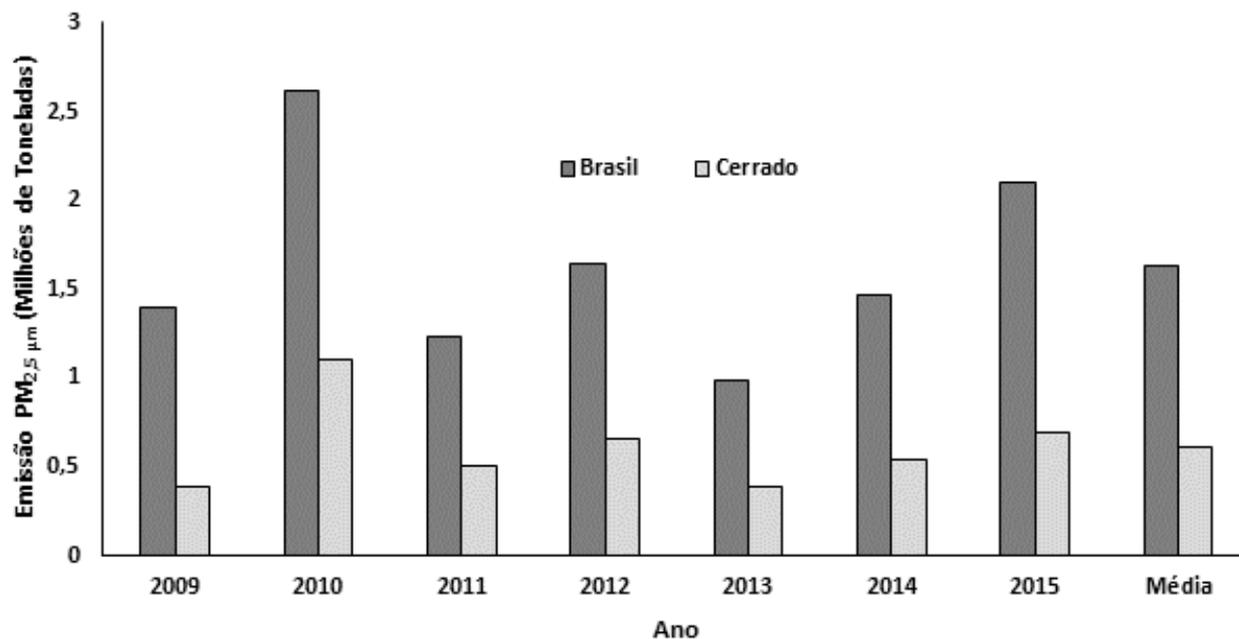


Figura 4: Total anual de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido pela queima de biomassa no Brasil e no bioma Cerrado durante o período 2009-2015. Fonte: Autores (2018).

Em média, 1,63 milhões de toneladas de $PM_{2,5 \mu m}$ foram emitidas anualmente pela queima de biomassa no Brasil durante o período 2009-2015, sendo que desse total 37 % (cerca de 0,61 milhões de toneladas) ocorreram no bioma Cerrado. O Cerrado foi, nesse período, o segundo bioma brasileiro que mais emitiu $PM_{2,5 \mu m}$ atrás apenas do bioma Amazônia, que emitiu 45 % do total nacional. No entanto, deve-se atentar para alguns fatores: I) a extensão territorial do bioma Cerrado é praticamente a metade da área do bioma Amazônia, portanto, a densidade da emissão de $PM_{2,5 \mu m}$ (toneladas km^{-2}) é maior no Cerrado do que na Amazônia; II) a emissão varia de acordo com o tipo de espécie vegetal: espécies típicas da Amazônia tendem a emitir mais quando comparadas com espécies vegetais do Cerrado; deste modo, a maior área queimada detectada no Cerrado (MOREIRA DE ARAÚJO *et al.*, 2012) não significa necessariamente que a maior emissão ocorre no Cerrado. Cabe ainda destacar que o uso do fogo por comunidades tradicionais em processos produtivos é mais comum no bioma Amazônia do que no Cerrado.

A maior emissão anual ocorreu em 2010 tanto no Brasil quanto no Cerrado, ano em que as emissões do bioma corresponderam a 42 % das emissões brasileiras de $PM_{2,5 \mu m}$. Nesse ano, a emissão de $PM_{2,5 \mu m}$ no Cerrado foi equivalente à emissão do bioma Amazônia. Também cabe destacar o ano de 2015, que apresentou a segunda maior emissão anual nacional de $PM_{2,5 \mu m}$ (1,09 milhões de toneladas) e no bioma Cerrado (0,69 milhões de toneladas, cerca de 33 % do total emitido no Brasil). Tal padrão de maior emissão em 2010 foi o mesmo encontrado por Hooghiemstra *et al.* (2012) ao analisarem a variação interanual das emissões de CO emitido pela queima de biomassa na América do Sul para o período 2006-2010.

Ao analisar o padrão das emissões de $PM_{2,5 \mu m}$ na área do Cerrado, é evidenciado que as maiores estimativas estão localizadas no norte do bioma, como apresentado na **Figura 5**. A região norte do bioma é a atual área de expansão da fronteira agrícola no Cerrado, onde foram encontrados valores médios anuais de emissão de $PM_{2,5 \mu m}$ superiores a 1.300 toneladas para um único ponto da grade regular de 0,18°, especialmente na transição entre o Cerrado e a Amazônia (acúmulo de células em tons vermelhos). Tal concentração na área de transição possivelmente está ligada ao uso do fogo para alteração no uso e cobertura da terra em áreas onde a vegetação possui características mais parecidas com a vegetação amazônica, que, como discutido anteriormente, tendem a emitir mais do que formações savânicas.

De acordo com mapeamento atual do uso e cobertura da terra no bioma Cerrado, os estados de Tocantins, Bahia, Maranhão e Piauí ainda possuem grande parte de seu território coberto por remanescentes naturais do Cerrado (INPE, 2015), o que os torna potenciais para a expansão agrícola com o consequente uso do fogo, em especial na região da fronteira entre os quatro estados (região conhecida como MATOPIBA). Como o processo de ocupação do Cerrado teve início pelo sul do bioma, são poucos os remanescentes naturais nessa porção do bioma. Assim sendo, a conversão

do uso e cobertura da terra de áreas naturais para usos agropecuários não é frequente, o que explicaria a baixa concentração das emissões de $PM_{2,5 \mu m}$. A exceção no sul do bioma (5 células com tons vermelhos e células com tons amarelos) deve-se provavelmente à cultura da cana-de-açúcar, em que o uso do fogo para facilitar a colheita da produção ainda é comum, apesar de proibido em áreas de baixa declividade no estado de São Paulo, o maior produtor nacional.

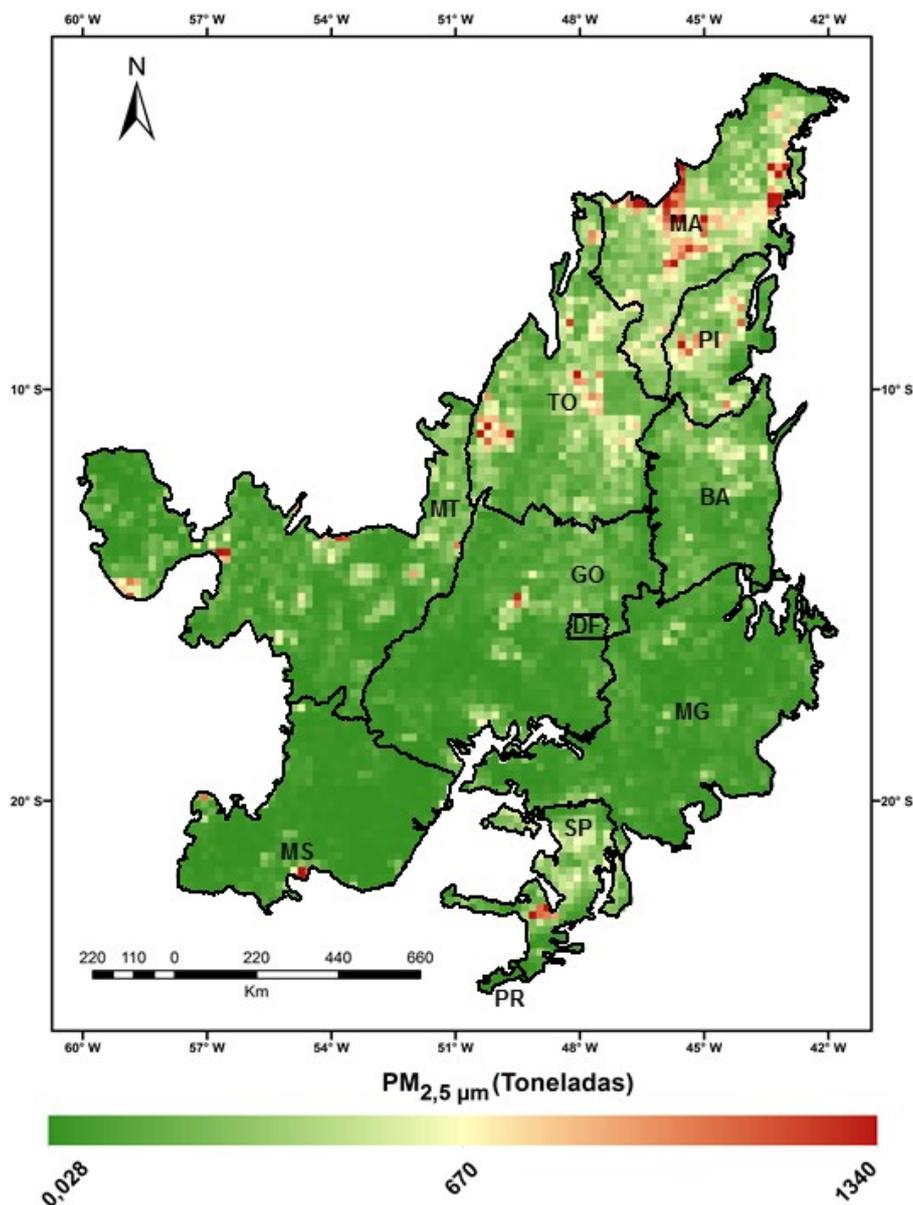


Figura 5: Distribuição espacial da média anual de $PM_{2,5 \mu m}$ emitido pela queima de biomassa no bioma Cerrado durante o período 2009-2015 considerando uma grade regular de $0,18^\circ$. Fonte: Autores (2018).

5. Conclusões

Neste estudo, foram utilizados produtos derivados de sensores orbitais para estimar o $PM_{2,5 \mu m}$ emitido pela queima de biomassa no bioma Cerrado e no território brasileiro, além da variação temporal e espacial das emissões no bioma. Tal abordagem se mostrou eficiente para atingir os objetivos estabelecidos e tem potencial aplicação em diversas áreas de estudo onde a ocorrência de queimadas é frequente.

Os resultados evidenciam a significativa contribuição de $PM_{2,5 \mu m}$ associado à queima de biomassa ocorrida no Cerrado em escala nacional e credenciam estudos futuros no com o objetivo de analisar o impacto dessas emissões no clima e na saúde humana. Adicionalmente, foi possível observar que as emissões de $PM_{2,5 \mu m}$ não são necessariamente maiores onde a área queimada ocorre em maior número, pois, de acordo com a literatura, o bioma Cerrado apresenta a maior área queimada no Brasil, no entanto a maior emissão de $PM_{2,5 \mu m}$ foi encontrada no bioma Amazônia devido à influência do tipo de vegetação no total emitido.

Os resultados também permitiram relacionar a maior concentração das emissões de $PM_{2,5 \mu m}$ no Cerrado com o clima, pois os meses com maior emissão se inserem, em média, entre o fim da estação seca e o período de transição da estação seca para a chuvosa. No entanto, não se pode desconsiderar a contribuição antrópica, que é capaz de influenciar o padrão de variação temporal encontrado, de acordo com a técnica de manejo da terra empregada. A distribuição espacial das emissões de $PM_{2,5 \mu m}$ no Cerrado mostrou o padrão esperado, com a concentração das emissões no norte, a atual fronteira de expansão agrícola no bioma, em oposição ao sul do bioma, onde a ocupação é mais antiga e a conversão do uso e cobertura da terra de remanescentes naturais para outros usos não é frequente.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq, processo 162898/2015-0), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, processos 6123-2015-05 e 1511040/2015) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processos 2015/01389-4, 2016/10137-1 e 2017/09308-9) pelo apoio financeiro que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

À colaboração financeira firmada entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE) e Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) pelo Projeto Monitoramento Ambiental por Satélites no Bioma Amazônia (MSA), denominado MSA/BNDES, financiado pelo Fundo Amazônia.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 144 p.
- ALVES, N. O.; VESSONI, A. T.; QUINET, A.; FORTUNATO, R. S.; KAJITANI, G. S.; PEIXOTO, M. S.; HACON, S. S.; ARTAXO, P.; SALDIVA, P.; MENCK, F. C. M.; MEDEIROS, S. R. B. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, n. 10937, p. 1-13, 2017.
- BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; TAPPER, N. J.; COUTTS, A.; KERLEY, A.; O'GRADY, A. P. Fire impacts on surface heat, moisture and carbon fluxes from a tropical savanna in northern Australia. **International Journal of Wildland Fire**, v. 12, n. 4, p. 333-340, 2003.
- BOSSIOLLI, E.; TOMBROU, M.; KALOGIROS, J.; ALLAN, J.; BACAK, A.; BEZANTAKOS, S.; BISKOS, G.; COE, H.; JONES, B. T.; KOUVARAKIS, G.; MIHALOPOULOS, N.; PERCIVAL, C. J. Atmospheric composition in the Eastern Mediterranean: Influence of biomass burning during summertime using the WRF-Chem model. **Atmospheric Environment**, v. 132, p. 317-331, 2016.
- CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; MATAVELI, G. A. V.; SHIMABUKURO, Y. E. Avaliação dos modelos de emissão 3BEM e 3BEM_FRP no estado de Rondônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n.6, p. 1247-1264, 2015.
- CHAN, K. L. Biomass burning sources and their contributions to the local air quality in Hong Kong. **Science of the Total Environment**, v. 596-597, p. 212-221, 2017.
- COUTINHO, L. M. Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. (Org). **Fire in the Tropical Biota: Ecosystem Processes and Global Challenges**. Springer-Verlag: Berlin, Germany, 1990. p. 82–105.
- FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: SOLOMON, S. D.; QIN, M.; MANNING, Z.; CHEN, M.; MARQUIS, K. B.; AVERYT, M. T.; MILLER, H. L. (Orgs.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University, 2007. p. 129-234.
- FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; ALONSO, M. F.; PIERRE, M.; MARECAL, V.; GRELL, G.; STOCKLER, R.; MELLO, R. F.; SÁNCHEZ GÁCITA, M. PREP-CHEM-SRC – 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 419-433, 2011.

HOOGHIEMSTRA, P. B.; KROL, M. C.; van LEUWEN, T. T.; van der WERF, G. R.; NOVELLI, P. C.; DEETER, M. N.; ALBEN, I.; ROCKMAN, T. Interannual variability of carbon monoxide emission estimates over South America from 2006 to 2010. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. D15, p. 1-25, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2010. Biomas Brasileiros. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 16 mar. 2018.

ICHOKU, C.; ELLISON, L. T.; WILLMOT, K. E.; MATSUI, T.; DEZFULI, A. K.; GATEBE, C. K.; WANG, J.; WILCOX, E. M.; LEE, J.; ADEGOKE, J.; OKONKWO, C.; BOLTEN, J.; POLICELLI, F. S.; HABIB, S. Biomass burning, land-cover change, and the hydrological cycle in Northern sub-Saharan Africa. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 1-13, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). 2015. Projeto TerraClass Cerrado: Mapeamento do uso e cobertura da terra no Cerrado. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

JOHNSTON, F. H.; HENDERSON, S. B.; CHEN, Y.; RANDERSON, J. T.; MARLIER, M.; DEFRIES, R. S.; KINNEY, P.; BOWMAN, D. M. J. S.; BRAUER, M. Estimated Global Mortality Attributable to Smoke from Landscape Fires. **Environmental Health Perspectives**, v. 120, n. 5, p. 695-701, 2012.

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.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

LEVINE, J. S. **Biomass burning and the production of greenhouse gases**. In: ZEPP, R. G. (Ed.). *Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change*, 1994.

LIBONATI, R., DaCAMARA, C. C., SETZER, A. W., MORELLI, F., MELCHIORI, A. E. An algorithm for burned area detection in the Brazilian Cerrado using 4 μm MODIS Imagery. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 15782-15803, 2015.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 13, p. 5785-5795, 2010.

MATAVELI, G. A. V.; SILVA, M. E. S.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; KAWAKUBO, F. S.; BERTANI, G.; COSTA, J. C.; RAMOS, R. C.; SILVA, V. V. Satellite observations for describing fire patterns and climate-related fire drivers in the Brazilian savannas. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 1, p. 125-144, 2018.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C.; MIRANDA, A. C. The Fire Factor. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Orgs.). *The Cerrados of Brazil*. New York: Columbia University Press, 2002. p. 51-68.

MOREIRA DE ARAÚJO, F.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian biomes: An analysis based on satellite data for the 2002–2010 period. **Remote Sensing**, v. 4, n. 7, p. 1929-1946, 2012.

MOREIRA DE ARAÚJO, F.; FERREIRA, L. G. Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 36, p. 94-102, 2015.

NOGUEIRA, J. M. P.; RAMBAL, S.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; MOUILLOT, F. Spatial pattern of the seasonal drought/burned area relationship across Brazilian biomes: Sensitivity to drought metrics and global Remote-Sensing fire products. **Climate**, v. 5, n. 2, p. 1-21, 2017.

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.; SIQUEIRA, R.; ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. L.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; KAISER, J. W.; WOOSTER, M. J. Assessment of fire emissions inventories during the South American biomass burning analysis (SAMBBA) experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, p. 6961-6975, 2016.
- PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present, **Fire Ecology**, v. 7, n. 1, p. 24-39, 2011.
- RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna national park: Rethinking management strategies. **Environmental Management**, v. 26, p. 675-684, 2000.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Orgs.). **Cerrado: Ecologia e Flora. Embrapa Cerrados**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 89-166.
- van der WERF, G.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; GOBRON, N.; DOLMAN, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, n. 3, p. 1-13, 2008.
- van der WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLAT, G. J.; MU, M.; KASIBHATLA, P. S.; MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; JIN, Y.; van LEEUWEN, T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 11707-11735, 2010.
- van der WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; van LEEUWEN, T. T.; CHEN, Y.; ROGERS, B. M.; MU, M.; van MARLE, M. J. E.; MORTON, D. C.; COLLATZ, G. J.; YOKELSON, R. J.; KASIBHATLA, P. S. Global fire emissions estimates during 1997–2016. **Earth System Science Data**, v. 9, n. 2, p. 697-720, 2017.
- 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.; FREEBORN, P. H.; XU, W.; GOVAERTS, Y.; BEEBY, R.; HE, J.; LATTANZIO, A.; FISHER, D.; MULLEN, R. LSA SAF Meteosat FRP products - Part 1: algorithms, product contents, and analysis. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 22, p. 13217–13239, 2015.