

ANÁLISE ESPACIAL DAS QUEIMADAS E SEUS IMPACTOS EM MINAS GERAIS PARA O ANO DE 2014

Francielle da Silva Cardozo

Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ
franciellecadozo@ufs.edu.br

Gabriel Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ
pereira@ufs.edu.br

Guilherme Augusto Verola Mataveli

Universidade de São Paulo - USP
mataveli@usp.br

Raquel de Cássia Ramos

Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ
raquel.cassia15@gmail.com

Laura Rafaela Soares da Silva

Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ
laurasres.geo@gmail.com

Bruna Cardoso de Faria

Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ
bcdefaria@gmail.com

RESUMO

As queimadas produzem alterações significativas no meio-ambiente e alteram o balanço radiativo da superfície. Neste contexto, o objetivo principal consistiu na análise das áreas queimadas e seus impactos em Minas Gerais no ano de 2014 a partir de imagens do satélite Landsat 8 para o mapeamento das áreas queimadas, além dos dados de precipitação do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). A análise das variações ambientais foram obtidas do produto MOD13A3 (Índice de vegetação mensal) do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Para a obtenção da *Fire Radiative Power* (FRP) e da estimativa do total particulado emitido foram utilizados focos de queimada disponibilizados pelos satélites Aqua, Terra, *Meteosat Second Generation* (MSG) e *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES). A integração da FRP foi realizada a partir do somatório da FRP inserida na grade e integrada a partir do método dos trapézios. Assim, percebe-se que Minas Gerais apresentou 4,05% de sua área queimada no ano de 2014, ocorrendo em maioria em áreas de savana e áreas agrícolas, liberando 4.790 toneladas de total particulado para a atmosfera. Ainda, a precipitação para 2014 apresentou uma anomalia negativa, influenciando na condição da vegetação, porém, constatou-se que os fatores de ordem antrópica foram os principais causadores das queimadas, principalmente a partir da abertura e manutenção de áreas destinadas à agropecuária.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Biomassa queimada; Variação ambiental.

SPATIAL ANALYSIS OF BURNINGS AND ITS IMPACTS IN MINAS GERAIS FOR THE 2014 YEAR

ABSTRACT

The fires produce significant changes in the environment and alter the surface radiative balance. Thus, the main objective of this article is the analysis of burned areas and their impacts in Minas Gerais during 2014 from the images of the Operational Land Imager (OLI) sensor onboard Landsat 8 to map the burned areas, as well as precipitation data from

Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). The environmental variation analysis were obtained by the MOD13A3 product (monthly vegetation index) from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor. In order to obtain the Fire Radiative Power (FRP) and the estimation of the total particulate emitted, hotspots data detected by the products derived from the satellites Aqua, Terra, Meteosat Second Generation (MSG) and Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) were used. The FRP integration was performed from the sum of the FRP inserted in the grid and integrated from the trapezoids method. Consequently, Minas Gerais presented 4.05% of burned areas in 2014, occurring mostly in savanna and agricultural areas, releasing 4,790 tons of particulate matter to the atmosphere. Moreover, the precipitation presented a negative anomaly, influencing the vegetation condition, however, it was verified that the anthropogenic factors were the main causes of fires, mainly used for opening and maintaining areas destined to agriculture and livestock.

Keywords: Remote sensing; Biomass burning; Environmental variation.

INTRODUÇÃO

A queima de biomassa pode ser considerada como uma das principais técnicas de manejo de conversão da vegetação em áreas antrópicas, utilizadas principalmente no Uso e Cobertura da Terra (UCT), ocasionadas predominantemente pelas atividades econômicas a partir da abertura de novas áreas destinadas à agropecuária, assim como na limpeza e controle de pestes para a manutenção de áreas já existentes (SAMPAIO et al., 2007; MARENGO et al., 2010; BUSTAMANTE et al., 2016).

O período de atuação ocorre principalmente na época seca de cada região, pois a baixa incidência da precipitação e a baixa umidade tornam a vegetação mais suscetível ao fogo, facilitando a utilização desta prática. Ainda, fatores naturais como o tipo e umidade da biomassa, e fatores climáticos como a temperatura e a umidade do ar e os ventos influenciam na ignição do fogo e na sua permanência (CRUTZEN e ANDREAE, 1990; FREITAS et al., 2005; FEARNside et al., 2009). Esse processo é amplamente utilizado, pois facilita e torna mais rápida a abertura e a limpeza de novas áreas, além de favorecer a ciclagem de nutrientes no solo. Entretanto, as queimadas provocam diversos impactos na superfície e na atmosfera devido ao consumo de extensas áreas de florestas e gramíneas em todo o globo, que muitas vezes ultrapassam os limites originais de utilização (FREITAS et al., 2005; LONGO et al., 2013).

Neste contexto, cada ecossistema responde de uma forma diferente às queimadas, em alguns casos as queimadas favorecem a mineralização dos nutrientes liberados no solo e que são absorvidos pelas plantas, fazendo com que o sistema retorne mais vigoroso, como, por exemplo, as pastagens do Cerrado brasileiro. Entretanto, dependendo da intensidade da queimada, além de eventos sucessivos em uma mesma área, elas podem ser destrutivas pois alteram a taxa de infiltração e evapotranspiração da água no solo, aumentando a suscetibilidade à erosão, além da total destruição da flora e fauna local (COCHRANE e RYAN, 2009). Ainda, vale ressaltar que alguns sistemas, como as florestas do bioma Amazônia, não são adaptados ao fogo, sendo que a vegetação na maioria dos casos é totalmente consumida levando à total destruição das plantas.

Além dos impactos ambientais mencionados, as queimadas também causam impactos sociais, como o fechamento de aeroportos e rodovias, além do aumento na incidência de problemas respiratórios na população. Outro impacto significativo ocorre no clima, pois as queimadas alteram as características físico-químicas e biológicas da superfície, ocasionando uma maior absorção da radiação solar, que aumenta a temperatura da superfície e altera os fluxos de calor latente e sensível, resultando na modificação direta do balanço de energia e da evapotranspiração (MORAES et al., 2004; VAN DER WERF et al., 2006; PEREIRA et al., 2009; CARDOSO et al., 2009; BOWMAN et al., 2009; MAO et al., 2014). Ainda, as queimadas liberam grandes quantidades de gases traço e aerossóis para a atmosfera, desta forma, ocorre uma maior retenção da radiação de ondas longas emitidas pela superfície, fator que modifica a disponibilidade de energia necessária para a realização dos processos atmosféricos, ocasionando, portanto, a alteração do clima local, regional e global

(ANDREAE e MERLET, 2001; ICHOKU e KAUFMAN, 2005; VERAVERBEKE et al., 2014; ICHOKU e ELLISON, 2014).

O Estado de Minas Gerais apresenta uma grande diversidade florestal, abrangendo três domínios do bioma brasileiro: (a) Caatinga, localizada ao norte do Estado e ocupando menos de 2% do território; (b) Mata Atlântica, ocupando em torno de 41% e localizada na porção oriental; (c) Cerrado, bioma predominante na área de estudo, localizado na porção centro-ocidental e abrangendo em torno de 57% da área total do Estado (COURA, 2007; IEF, 2012). O processo de ocupação em Minas Gerais sofreu com o passar dos anos uma intensa exploração ambiental, que aliado a uma política ineficiente de desenvolvimento, tem provocado uma crescente extinção de sua diversidade biológica, principalmente pelo uso intenso da agricultura, pecuária e monoculturas. Os ecossistemas nativos sofreram o primeiro impacto pela introdução da cultura do café, seguidos pela exploração do minério de ferro, favorecendo a implantação da indústria siderúrgica (DRUMMOND et al., 2005).

De acordo com o grupo de Monitoramento de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a ocorrência das queimadas na área de estudo vem aumentando com o passar dos anos. Desde o ano de 1998, início de obtenção dos dados, até o final do ano de 2016, o número de focos de queimadas encontrados no Estado totaliza 170.117, denotando que essa prática é bastante utilizada para a conversão do uso e cobertura da terra (UCT) na área de estudo. Ainda, de acordo com os dados do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), o Estado de Minas Gerais apresentou diversos anos com índices de precipitação muito abaixo das médias, com destaque para o ano de 2014, que teve o menor índice de precipitação para a série histórica abrangendo os anos de 2000 a 2015, apresentando aproximadamente 1.050 milímetros (mm) de precipitação acumulada.

Desta forma, as alterações provocadas no UCT, assim como seus impactos, necessitam de sistemas contínuos de mapeamento e monitoramento. Para este propósito, o aperfeiçoamento nas técnicas de sensoriamento remoto aliado ao advento de novos produtos operacionais permitem a obtenção de informações físico-químicas e biológicas de extensas áreas da superfície de forma mais rápida e sistemática a baixos custos. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho consistiu na análise das áreas queimadas e seus respectivos impactos no Estado de Minas Gerais no ano de 2014 a partir do uso de produtos derivados do sensoriamento remoto.

METODOLOGIA

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Minas Gerais encontra-se na região Sudeste, localizado nas coordenadas 14°13'58" e 22°54'00" N e 39°51'32" e 51°02'35" O, possuindo área de 586,528 km² (Figura 1).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima do Estado pode ser dividido em: (a) Clima tropical de savana com estação seca de inverno (Aw), apresentando temperaturas médias acima de 18° no inverno; (b) Clima subtropical com inverno seco e verão quente (Cwa), possuindo temperaturas médias inferiores a 18° no inverno e superiores a 22° no verão; (c) Clima subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno (Cwb), apresentando temperaturas médias em torno de 22°; e (d) Clima seco com verão chuvoso (Bsw) (ANTUNES, 1986; SÁ JÚNIOR, 2009). A precipitação varia de acordo com a posição geográfica e com o relevo, apresentando 650 mm na região norte de Minas Gerais e valores que podem atingir 2.100 mm na região sul/sudeste do Estado. A estação chuvosa abrange o período de outubro a março, e a estação seca ocorre entre os períodos de abril a setembro (GUIMARÃES et al., 2010). Em relação à vegetação, na Figura 2 podem ser visualizados os biomas da área de estudo, assim como o uso e cobertura da terra, obtido do produto MCD12Q1 do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS).

Figura 1: Localização da área de estudo

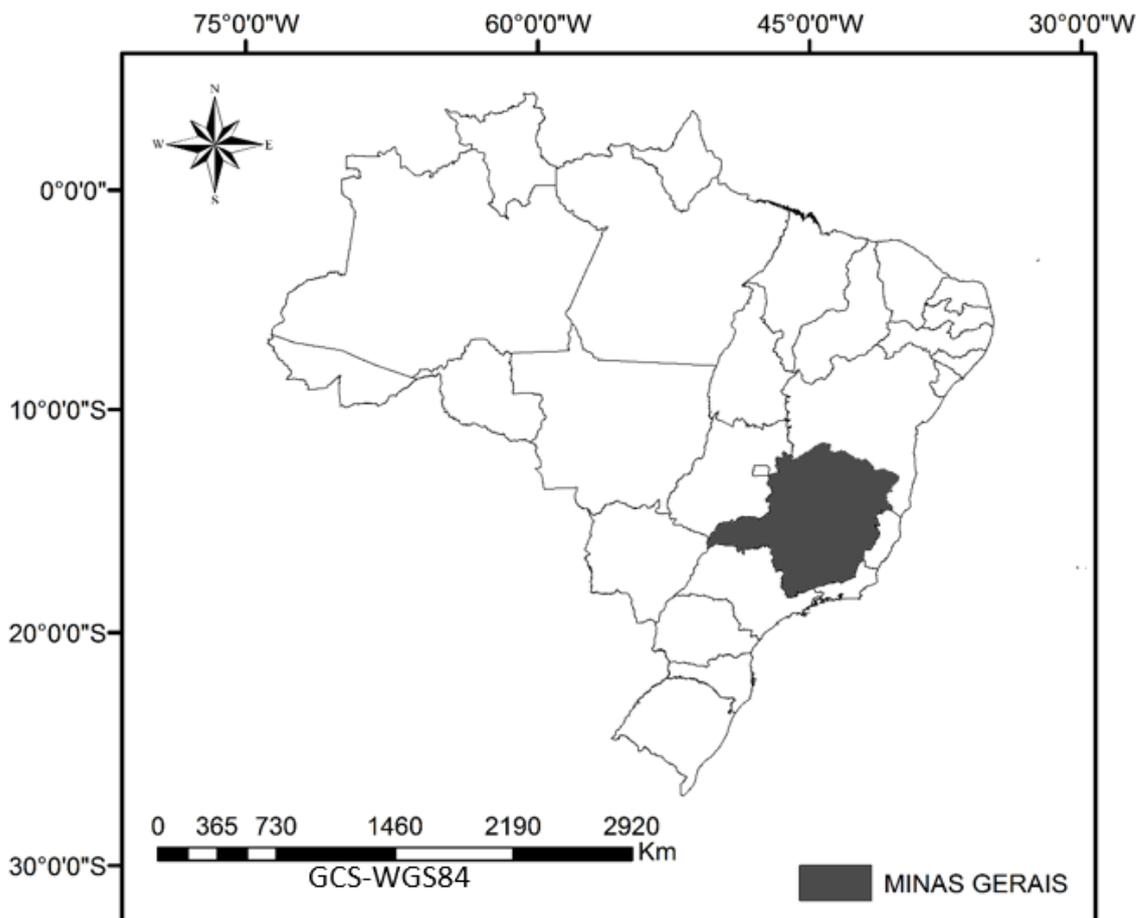
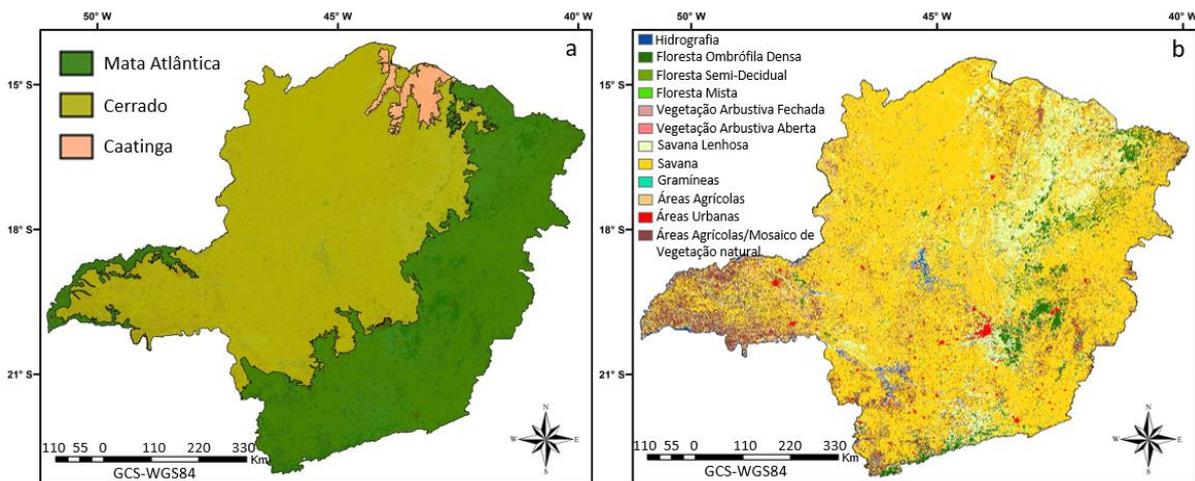


Figura 2: Biomas presentes em Minas Gerais (a) e Uso e Cobertura da Terra (b)



O Cerrado possui maior extensão na área de estudo, apresentando fisionomias que englobam formações florestais (espécies arbóreas com formação de dossel contínuo ou descontínuo), savânicas (árvores e arbustos espalhados sobre gramíneas sem formação de dossel contínuo) e campestres (predomínio de vegetação herbácea, com pouca vegetação arbustiva e árvores), compostas pelo Campo, Campo Cerrado, Cerrado *Strictu sensu*, Cerradão e Veredas, compondo um tipo vegetacional de gramíneas, arbustos e árvores. Esse tipo de paisagem se inicia na região Sul e se espalha até o Oeste do Estado, localizado especialmente nas bacias do rio São Francisco e Jequitinhonha, onde as estações secas e chuvosas são bem definidas (DRUMMOND et al., 2005).

A Mata Atlântica aparece como o segundo maior bioma em extensão, apresentando as formações compostas pelo Campo Rupestre (formação arbustiva, ocupando trechos de afloramentos rochosos, serras e locais com altitudes acima de 900 m), Floresta Estacional Semi-Decidual (presente em locais com as estações chuvosa e seca bem definidas, apresentando uma perda parcial das folhas no período seco, especialmente no estrato arbóreo) e Floresta Ombrófila, que compõe uma vegetação permanentemente verde e densa, presente em locais com precipitação bem definida e alta umidade. Os campos rupestres se localizam no centro do Estado e a floresta atlântica apresenta sua maior abrangência na faixa Leste do Estado. O bioma Caatinga localiza-se na região Norte do Estado e abrange a floresta Estacional Decidual. Nessa região ocorre uma estação chuvosa seguida de um longo período seco, apresentando árvores baixas e arbustos que, em geral, perdem as folhas na estação das secas (COURA, 2007; GUIMARÃES et al., 2010; IEF, 2016).

A Mata Atlântica sofre a muitos anos um processo grave de desmatamento e fragmentação de seus remanescentes florestais. Desde 1985, segundo dados do INPE em conjunto com a Fundação SOS Mata Atlântica, quase 1 milhão e 900 mil hectares de florestas foram devastadas nos Estados que concentram aproximadamente 90% do restante do bioma Brasil. Nos últimos dez anos, o Estado de Minas Gerais contribuiu com a supressão de 77.694 hectares, sendo o líder de desmatamento no *ranking* dos Estados em todo esse período. Atualmente a Mata Atlântica mineira se encontra reduzida a poucos fragmentos, localizada principalmente no Parque Estadual do Rio Doce na região leste do Estado (AMDA, 2005).

O Cerrado também é constantemente substituído por outros tipos de usos da área de estudo. Ao longo do processo de ocupação do Estado, amplas áreas de vegetação do Cerrado foram substituídas por culturas agrícolas ou transformadas para a implantação de atividades agropecuárias. Ainda, outro fator importante de supressão ocorreu com o potencial de reservas de minério de ferro no Estado, onde a vegetação nativa foi explorada como fonte de matéria-prima para carvoarias, reduzindo a cobertura vegetal desse bioma de maneira drástica. A cobertura vegetal restante está restrita a remanescentes fragmentados e esparsos, podendo ser encontrada em maior parte apenas no norte de Minas Gerais, particularmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha (COURA, 2007).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

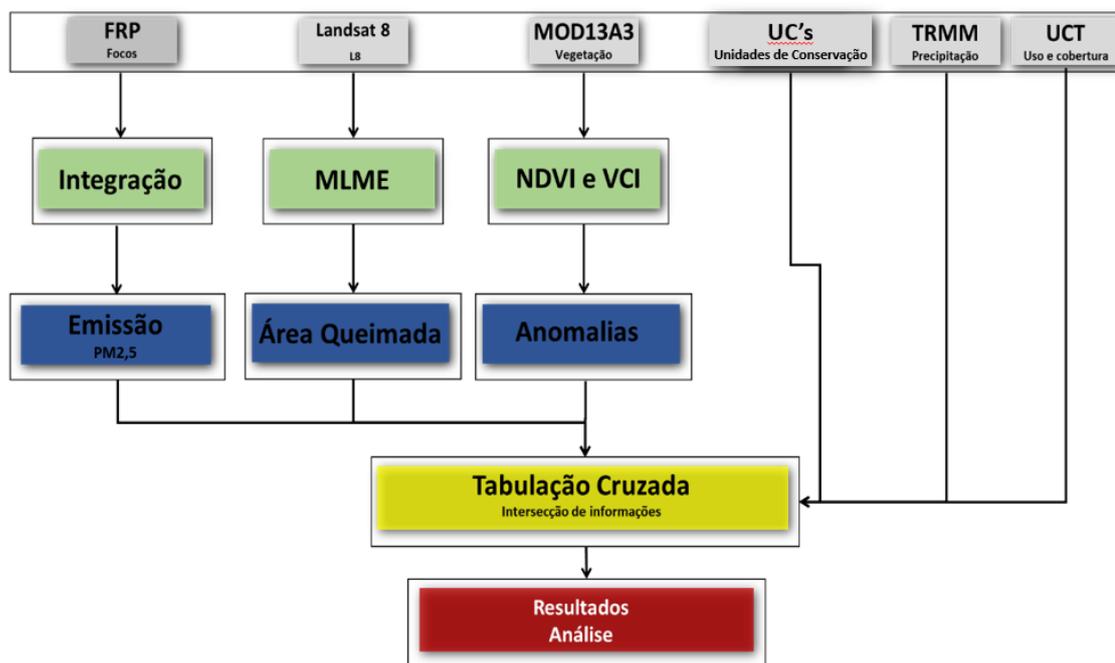
A Figura 3 exhibe o fluxograma da metodologia separado em 5 etapas: I) dados utilizados (em cinza claro); II) Processamentos iniciais (em verde claro); III) resultados dos processamentos (em azul); IV) o cruzamento dos dados (em amarelo); e V) a análise dos resultados (em vermelho).

Para a delimitação e análise da área queimada, foram utilizadas 35 cenas do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat 8, que apresenta resolução temporal de 16 dias e resolução radiométrica de 16 *bits*. O sensor OLI possui onze bandas espectrais, seis delas abrangem as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, com 30 metros de resolução espacial, além da banda de aerossol costeiro e outra de *cirrus*. Ainda, possui duas bandas na região do infravermelho termal (100 metros) e uma banda pancromática de 15 metros. Primeiramente foi utilizado a técnica do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), que consiste na utilização de uma relação linear para representar a mistura espectral dos alvos em cada *pixel* (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Deste modo, ao analisar uma área queimada, os *pixels* puros (*endmembers*) a serem utilizados como dados de entrada são selecionados diretamente na imagem a partir de *pixels* que possuam resposta espectral mais próxima da curva teórica esperada para alvos puros. Os *endmembers* geralmente utilizados para cada conjunto de dados referem-se às imagens fração vegetação, solo e sombra, conforme Equação 1.

$$\rho_i = a * vegi + b * soloi + c * sombrai + ei \quad (1)$$

em que ρ_i é a resposta da refletância do *pixel* na banda *i*; *a*, *b* e *c* são as proporções de vegetação, solo e sombra, respectivamente; *vegi*, *soloi* e *sombrai* são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e *ei* é o erro na banda *i*.

Figura 3: Fluxograma da metodologia



Sendo assim, o MLME foi aplicado nas imagens Landsat 8 com o intuito de gerar a fração sombra, que realça os alvos de baixa refletância representados pelas áreas queimadas. A extração dos *endmembers* foi realizada no programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI) e, posteriormente, o MLME foi aplicado a partir de um *script* criado no *Interactive Data Language* (IDL), em que o processamento foi aplicado para todas as 35 cenas ao mesmo tempo e utilizando os mesmos *endmembers* coletados.

Após a aplicação do MLME no ENVI, todas as imagens fração sombra resultantes foram inseridas no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) e segmentadas com o intuito de gerar polígonos espectralmente homogêneos. O próximo passo consistiu na seleção de limiares de similaridade (limiar mínimo em que duas regiões são consideradas similares e agrupadas em um único polígono) e área (área mínima em número de *pixels* para que uma região seja individualizada). Os valores de limiares escolhidos foram 12 para similaridade e 8 para área, sendo realizada então a edição topológica, onde foram atribuídos os polígonos das áreas queimadas às suas respectivas classes. A etapa final envolveu a edição manual do mapeamento com a finalidade de corrigir eventuais erros decorrentes da classificação.

Os dados de precipitação foram extraídos do satélite TRMM, que foi desenvolvido a partir de uma parceria da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) do Japão, lançado em 1997 com objetivo de monitorar, estudar e estimar a precipitação nos trópicos. A coleta de dados compreende área entre 50° N e 50° S, possui

resolução espacial de 0,25°x0,25° (aproximadamente 28 km), adquire informações horárias (produto 3B42), diárias (produto 3B42 derivada) e mensais (produto 3B43) e possui como principais sensores o *Microwave Imager* (TMI) e o *Precipitation Radar* (PR) (COLLISCHONN et al., 2007). Nesse estudo, foi utilizado o produto 3B43 para obter a precipitação mensal para o ano de 2014. Os dados do TRMM foram obtidos em *Network Common Data Form* (NetCDF), sendo então convertidos para o formato GEOTIFF no software ArcGIS, e recortados para a área de estudo, obtendo-se desta forma os valores médios mensais de precipitação para o Estado de Minas Gerais.

Para a análise das variações ambientais, foram utilizados dados do produto MOD13A3 do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) inserido nos satélites Aqua e Terra. Esse produto refere-se ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), produto mensal que possui resolução espacial de 1 km, onde os dados são gerados a partir da obtenção do melhor *pixel* e maior valor de NDVI em uma mesma região para um período de 16 dias. O NDVI é um dos índices mais utilizados para caracterizar a seca ou estresse hídrico da vegetação (ROUSE et al., 1974). O cálculo do NDVI utiliza a razão normalizada entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo, variando entre -1 e 1, onde valores próximos a um (1) indicam áreas com alto vigor vegetativo, e valores próximos a zero (0) indicam áreas com maior estresse hídrico. O NDVI pode ser obtido a partir da Equação 2:

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_{vermelho}}{\rho_{ivp} + \rho_{vermelho}} \quad (2)$$

em que ρ_{ivp} representa a reflectância *in-band* na faixa do espectro eletromagnético (EEM) referente ao infravermelho próximo (0,73 μ m–1,3 μ m) e $\rho_{vermelho}$ corresponde a faixa do EEM relativo ao vermelho (0,622 μ m–0,700 μ m) do sensor MODIS (ROUSE et al., 1974). Para a utilização do produto MOD13A3, foram necessários os *tiles* h13v10, h13v11, h14v10 e h14v11. Os dados são adquiridos em *Hierarchical Data Format* (HDF), sendo então convertidos para o formato GEOTIFF e reprojatados para Lat/Lon WGS84 utilizando a ferramenta MODIS *Reprojection Tool* (MRT). Posteriormente, no ArcGIS foram obtidos os valores médios mensais de NDVI para a área de estudo.

Outra variação ambiental analisada neste trabalho refere-se ao Índice de Condição da Vegetação (VCI), desenvolvido por Kogan (1995), que utiliza as informações obtidas do NDVI. O VCI é uma importante fonte de informação referente aos impactos provocados pelas secas, além de ser uma variável importante no indicativo da suscetibilidade da vegetação ao fogo (JIAO et al., 2016). Dessa forma, o VCI foi estimado para analisar a condição de suscetibilidade da vegetação à ocorrência das queimadas na área de estudo no ano de 2014. O VCI pode ser obtido a partir da Equação 3:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 \quad (3)$$

Geralmente os valores utilizados para classificar a condição da vegetação são: vegetação extremamente seca (0 a 20%); vegetação seca (20 a 40%); vegetação com condição normal (40 a 60%); vegetação com condição boa (60 a 80%); e vegetação com condição ótima (80 a 100%). Para a obtenção do VCI, foram utilizados os valores máximos e mínimos ($NDVI_{max}$ e $NDVI_{min}$, respectivamente) obtidos do NDVI para cada *pixel* da área de estudo, obtendo-se desta forma os valores médios mensais. Para a estimativa da anomalia de NDVI e VCI, utilizou-se a média de todos os dados e sua relação com o mês ou ano em questão.

Com o objetivo de verificar qual tipo de UCT é mais impactado pelas queimadas, os dados foram obtidos do produto MODIS *Land Cover Type* (MCD12Q1), que utiliza a classificação do *International Geosphere-Biosphere Program* (IGBP) para a América do Sul anualmente com 500 metros de resolução espacial (BELWARD et al., 1999). Os dados são obtidos em *Hierarchical Data Format* (HDF), onde foram reprojatados para Geotiff no aplicativo MODIS *Reprojection Tool* (MRT). Posteriormente os dados foram inseridos no programa ArcGIS, sendo realizados os cruzamentos com a área queimada obtida do mapeamento no sensor OLI. Ainda, os polígonos de queimadas também

foram cruzados com os *shapes* dos Municípios de Minas Gerais e das áreas de conservação do estado para averiguar a espacialização e os impactos ocorridos no ano de 2014.

Para compor a base de dados de focos de queimadas, utilizaram-se diversos sensores com o intuito de adquirir informações a cada 15 minutos, que foram integrados de acordo com a metodologia abaixo e comparados com os polígonos mapeados. Neste contexto, utilizaram-se os produtos disponíveis dos satélites Aqua, Terra, *Meteosat Second Generation* (MSG) e *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES). O sensor MODIS está acoplado nas plataformas Terra e Aqua. O horário de passagem varia de acordo com a plataforma, o Terra (produtos com a sigla MOD) cruza o Equador em órbita descendente às 10h30min e 22h30min; o Aqua (produtos com a sigla MYD) cruza o Equador em órbita ascendente às 13h30min e 01h30min (JUSTICE, 2002). Os produtos utilizados foram o MOD14 e MYD14, que contém as informações sobre os focos de queimada e a *Fire Radiative Power* (FRP), metodologia proposta por Kaufman et al. (1996).

O MSG é um satélite geostacionário desenvolvido pela *European Space Agency* (ESA) em parceria com a *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). O *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager* (SEVIRI) é o principal sensor a bordo deste satélite, possui 12 bandas que adquirem informações das regiões do EEM referentes ao visível, infravermelho próximo, médio e termal, possuindo resolução temporal de 15 minutos. O *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) é um produto para detecção de focos de queimada baseado no sensor GOES *Imager* da constelação de satélites GOES e utiliza o método proposto por Wooster et al. (2005) para o cálculo da FRP, adquirindo informações da América do Sul, Central e do Norte em intervalos de 15-30 minutos.

Aplicando-se a Equação 4 nos produtos provenientes do MODIS, SEVIRI e GOES *Imager* foi obtida a FRP, que é a taxa que a energia, na forma de radiação eletromagnética, é emitida pelo fogo e liberada no processo de combustão, sendo um indicador da quantidade de biomassa consumida, da taxa de emissão de aerossóis e gases traços liberados para a atmosfera e da severidade do fogo. A FRP integrada em todos os comprimentos de onda pode ser obtida a partir do conhecimento da distribuição de temperatura no interior de um *pixel*, conforme Equação 4:

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

em que *FRP* representa a potência radiativa do fogo ($J.s^{-1}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} J.s^{-1}.m^{-2}.K^4$), A_n representa a área fracional (m^2) da n ésima componente termal (n , referente às diversas áreas em processo de combustão dentro de um mesmo *pixel*, quando analisado o sub-*pixel*), T_n^4 é a temperatura (em Kelvin, K) da n ésima componente e ϵ representa a emissividade. Ao integrar a FRP no tempo é obtida a Energia Radiativa do Fogo (FRE).

Os dados da FRP provenientes do GOES, SEVIRI e MODIS foram integrados a partir da aplicação de grades regulares com resolução espacial de 8 km, conforme metodologia proposta por Kaiser et al. (2012). Para obter a FRE, a primeira etapa consiste na eliminação de *pixels* com baixa confiabilidade (valores abaixo de 50% para os produtos MOD14, MYD14 e SEVIRI; e *flags* 4 e 5 para o produto WFABBA/GOES).

Quando o tamanho e temperatura do fogo superam a sensibilidade do sensor em captar a radiação eletromagnética, os *pixels* saturam, e esse fato provoca a perda de eventos importantes da queima de biomassa, sendo assim, foi utilizada uma alternativa para a estimativa da FRP baseada no método da radiância no infravermelho médio (MIR), fundamentada na premissa de que a radiância espectral (M_λ) emitida na banda centrada em $3,9 \mu m$ é linearmente proporcional à FRP emitida (WOOSTER, 2003; WOOSTER et al., 2005), conforme Equação 5:

$$FRP_{MIR} = \frac{A_g}{a} \sigma \int_{3,76}^{4,03} M(\lambda, T) d\lambda - M_b \quad (5)$$

em que A_g representa a área do *pixel* proveniente do sensor Imager/GOES; α é a constante baseada na resposta espectral na banda referente ao MIR e M_b é a emitância radiante para o *background*, integrada nos comprimentos de onda da banda utilizada (110 MW). A emitância radiante espectral (M) pode ser expressa por:

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} \quad (6)$$

em que C_1 e C_2 são constantes ($3,74 \times 10^8$ W.m² e $1,44 \times 10^4$ μ m.K, respectivamente); λ é o comprimento de onda (μ m); T representa a temperatura (Kelvin) e

Após calcular a FRP proveniente do produto WFABBA/GOES para os *pixels* saturados, foi originada uma grade (FRP_{grid}) composta pelo somatório de todos os focos detectados por todos os outros sensores $\xi(lon, lat)$, para um mesmo tempo (t) a partir da aplicação de uma máscara de convolução $\eta(\gamma, k)$, de tamanho $M \times N$ (colunas \times linhas), resultando em uma grade contendo o agrupamento de todos os focos de queimadas para um determinado passo de tempo (*timestep*) e para um mesmo par de coordenadas geográficas (lon, lat) que varia de acordo com o tamanho da máscara (γ, k , neste caso, 20 km ou 0.18 graus), conforme Equação 7:

$$FRP_{grid(lon, lat, t)} = \sum_{\gamma=-\alpha}^{\alpha} \sum_{k=-\beta}^{\beta} \eta(\gamma, k) \xi(lon + \gamma, lat + k, t) \quad (7)$$

A grade resultante para cada tempo é definida para todos os pontos em que a máscara de tamanho $M \times N$ sobrepõem completamente a imagem ($lon \in [\alpha, M - \alpha]$, $lat \in [\beta, N - \beta]$). Com o agrupamento da FRP para todos os focos detectados pelos satélites em um mesmo horário, as informações da evolução temporal dos focos são armazenadas, assim, com os valores de FRP e seus respectivos horários de ocorrência para cada ponto de grade. Com a localização do foco e a variação da FRP no tempo, a FRE é calculada pela Equação 8:

$$FRE_{grid(lon, lat)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (FRP_n + FRP_{n+1}) \cdot (T_{n+1} - T_n) \quad (8)$$

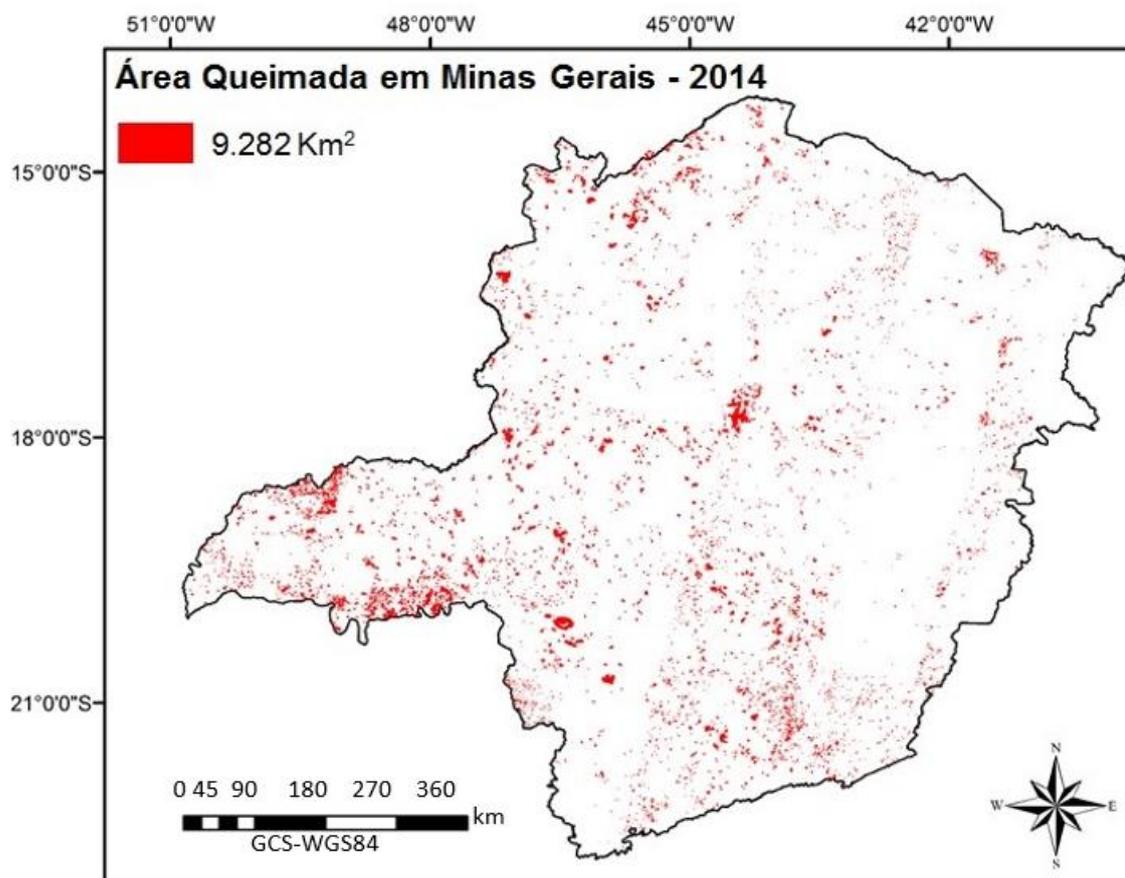
em que $FRE_{(lon, lat)}$ representa a localização geográfica (longitude e latitude) de determinado ponto da grade regular; T o intervalo entre as observações; e n representa a n ésima observação.

Nesta estimativa, assume-se que a distribuição espacial observada em parte da grade regular é representativa para a sua totalidade. Ainda, se na etapa de integração da FRP o intervalo entre duas aquisições for maior que 4 horas ($\Delta T > 14400$ s), assume-se a hipótese de duas ou mais queimadas independentes, iniciando, desta forma, a integração novamente a partir do ponto $t = 0$.

RESULTADOS

A Figura 4 mostra a área queimada que ocorreu no Estado de Minas Gerais no ano de 2014. No total, as áreas queimadas abrangeram 9.282 km², equivalente a 4,05% do total da área de estudo. Percebe-se que as queimadas estão localizadas em praticamente todo o Estado, principalmente na região oeste, que abrange a área do Triângulo Mineiro, sendo que as maiores cicatrizes estão localizadas na região noroeste, na região central e sudoeste do Estado.

Figura 4: Queimadas ocorridas no Estado de Minas Gerais no ano de 2014



A Figura 5a mostra o mapa com a média do NDVI do Estado de Minas Gerais para o ano de 2014, e a Figura 5b mostra o mapa de anomalia do NDVI para o ano de 2014, obtido de uma série temporal que abrange os anos de 2000 a 2015. De acordo com a Figura 5a, percebe-se que as áreas no mapa que possuem coloração verde são os locais que possuem maior vigor vegetativo, principalmente na faixa leste do Estado abrangendo o bioma Mata Atlântica, coincidindo com as áreas com menor ocorrência de queimadas. Locais que se aproximam da cor vermelha possuem valores mais baixos de NDVI, ou seja, o vigor vegetativo é menor, com destaque para as áreas que apresentam corpos hídricos, pois a Radiação Eletromagnética (REM) tende a ser absorvida pela água, podendo, desta forma, apresentar valores baixos e até negativos de NDVI. Outra área que apresenta valores baixos de NDVI está localizada na região norte, compondo o bioma Caatinga, que possui como característica uma vegetação mais seca.

A Figura 5b mostra a anomalia do NDVI para o ano de 2014 obtido da série temporal de 15 anos (2000-2015). Percebe-se que as áreas em verde denotam que o NDVI obteve um aumento de aproximadamente 15% quando comparado com a média de 15 anos, abrangendo áreas esparsas na região central e oeste da área de estudo. As áreas em tonalidade branca mostram que o NDVI se manteve estável em relação à média e as áreas em tons vermelhos mostram anomalias negativas do NDVI, principalmente na faixa central no Estado, na região nordeste e na região leste próximas à divisa com os Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro, apresentando 15% abaixo da média para 15 anos. A Figura 6a mostra o mapa com a média do VCI do Estado de Minas Gerais para o ano de 2014, e a Figura 6b mostra o mapa de anomalia do VCI para o ano de 2014, também obtido da série temporal que abrange os anos de 2000 a 2015.

Figura 5: Média do NDVI para o ano de 2014 no Estado de Minas Gerais (a) e Anomalia do NDVI (2000-2015) no Estado de Minas Gerais (b)

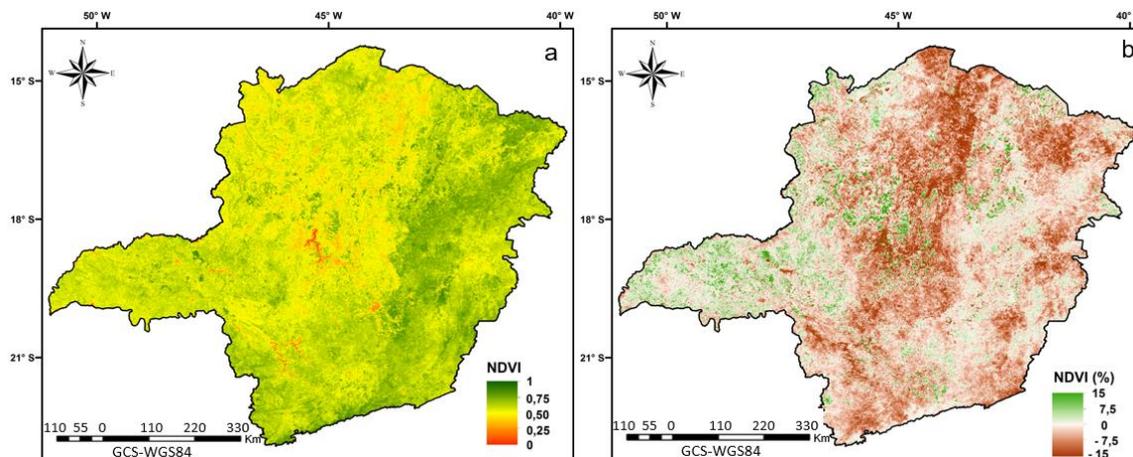
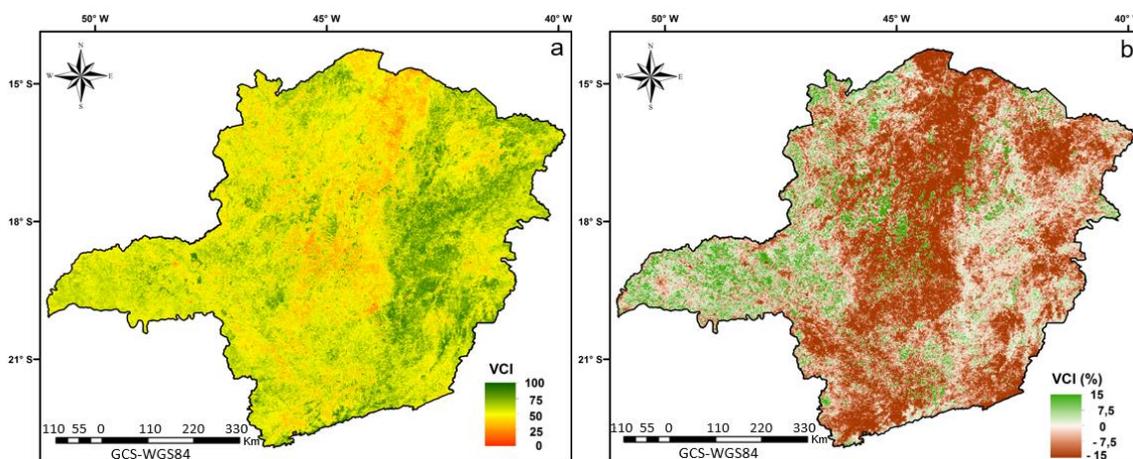


Figura 6. Média do VCI para o ano de 2014 no Estado de Minas Gerais (a) e Anomalia do VCI (2000-2015) no Estado de Minas Gerais (b).



De acordo com a Figura 6a, as áreas em vermelho apresentam VCI com valor entre 0 e 25%, indicando uma vegetação extremamente seca devido às condições ambientais e climáticas desfavoráveis, localizadas principalmente na região norte, na área composta pelo bioma Caatinga, e na área central do Estado no bioma Cerrado. As áreas em amarelo representam VCI com valores em torno de 50%, indicando que a condição da vegetação está normal, e as áreas em verde apresentam valores próximos a 100% e indicam que a condição da vegetação é excelente, localizadas principalmente na região leste compondo o bioma Mata Atlântica.

De uma forma geral, percebe-se que as queimadas ocorreram em minoria na região leste do Estado, coincidindo com áreas onde a condição da vegetação era excelente, da mesma forma, as áreas que apresentaram a condição da vegetação extremamente seca também apresentaram queimadas. Porém, percebe-se que as queimadas ocorreram por todo o Estado de Minas Gerais no ano de 2014, principalmente em locais onde a condição da vegetação era normal e até excelente, como na região

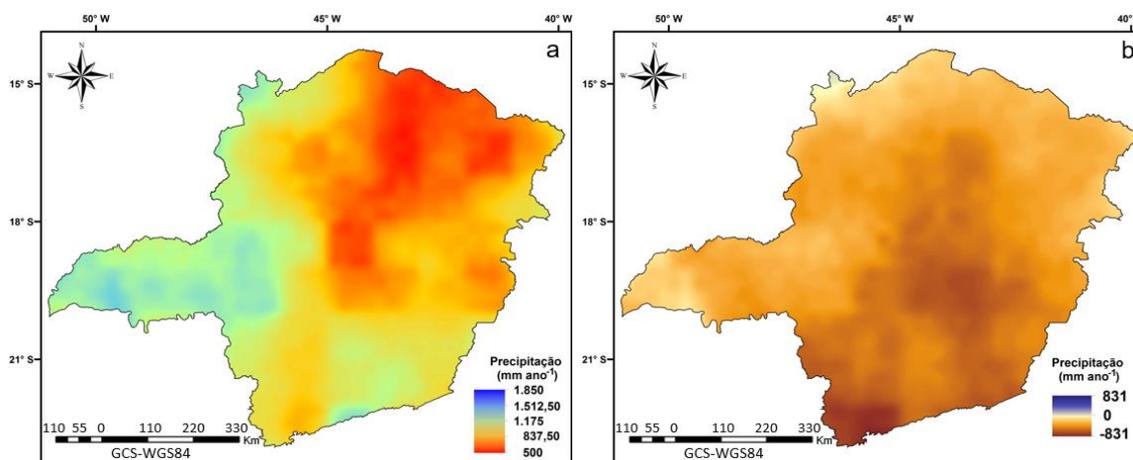
do Triângulo Mineiro. Este fato permite constatar que as condições naturais, como a vegetação mais seca e mais suscetível ao fogo, não necessariamente estão interligadas com a ocorrência das queimadas, denotando que na área de estudo o que impera seria o fator de ordem antrópica a partir da modificação do UCT.

A Figura 6b mostra a anomalia do VCI do ano de 2014 que varia de -15 a 15%, Valores positivos indicam que a vegetação está com um vigor vegetativo acima da média dos últimos 15 anos, da mesma forma, valores negativos indicam que a vegetação está com um vigor vegetativo abaixo da média, indicando que a mesma se encontra mais senescente que o normal. Percebe-se que, assim como o NDVI, o VCI apresentou uma anomalia negativa de 15% nas áreas em tonalidade vermelha, principalmente na faixa central no Estado, na região nordeste e na região leste próximas à divisa com os Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro. As áreas em branco indicaram que o VCI se manteve na média e as áreas em verde indicaram que o VCI apresentou um aumento de 15% no ano de 2014 quando comparado com a média de 15 anos.

A Figura 7a mostra o mapa com a média da precipitação do Estado de Minas Gerais para o ano de 2014, e a Figura 7b mostra o mapa de anomalia da precipitação para o ano de 2014, obtido da série temporal que abrange os anos de 2000 a 2015. Segundo os dados obtidos do TRMM, o ano de 2014 apresentou a menor taxa média anual de precipitação da série temporal de 15 anos. Percebe-se na Figura 7a que as áreas da região norte e central, assim como uma pequena área da região nordeste, apresentaram as menores taxas médias anuais, não ultrapassando 500 mm de precipitação. A menor taxa de precipitação coincide com as áreas em que o vigor vegetativo composto pelo NDVI foi mediano e baixo, e também coincide com as áreas onde a condição da vegetação era extremamente seca, seca e normal, composta pelo VCI.

Consequentemente, percebe-se que as condições da vegetação são influenciadas pela precipitação, pois nos locais nos quais a taxa de precipitação foi maior, alcançando até 1.850 mm, como na região oeste do Estado, o vigor vegetativo apresentou valores mais altos (Figura 7a, tons azuis na região do Triângulo Mineiro e noroeste do Estado) e a condição da vegetação estava entre normal e excelente. Assim, mesmo em anos com precipitação abaixo da média (Figura 7b), na qual a condição da vegetação é afetada pelo déficit hídrico, esta característica não é a única responsável pela incidência de queimadas, pois o desmatamento e manutenção de as áreas para o uso agropecuário desempenham um papel fundamental neste ciclo.

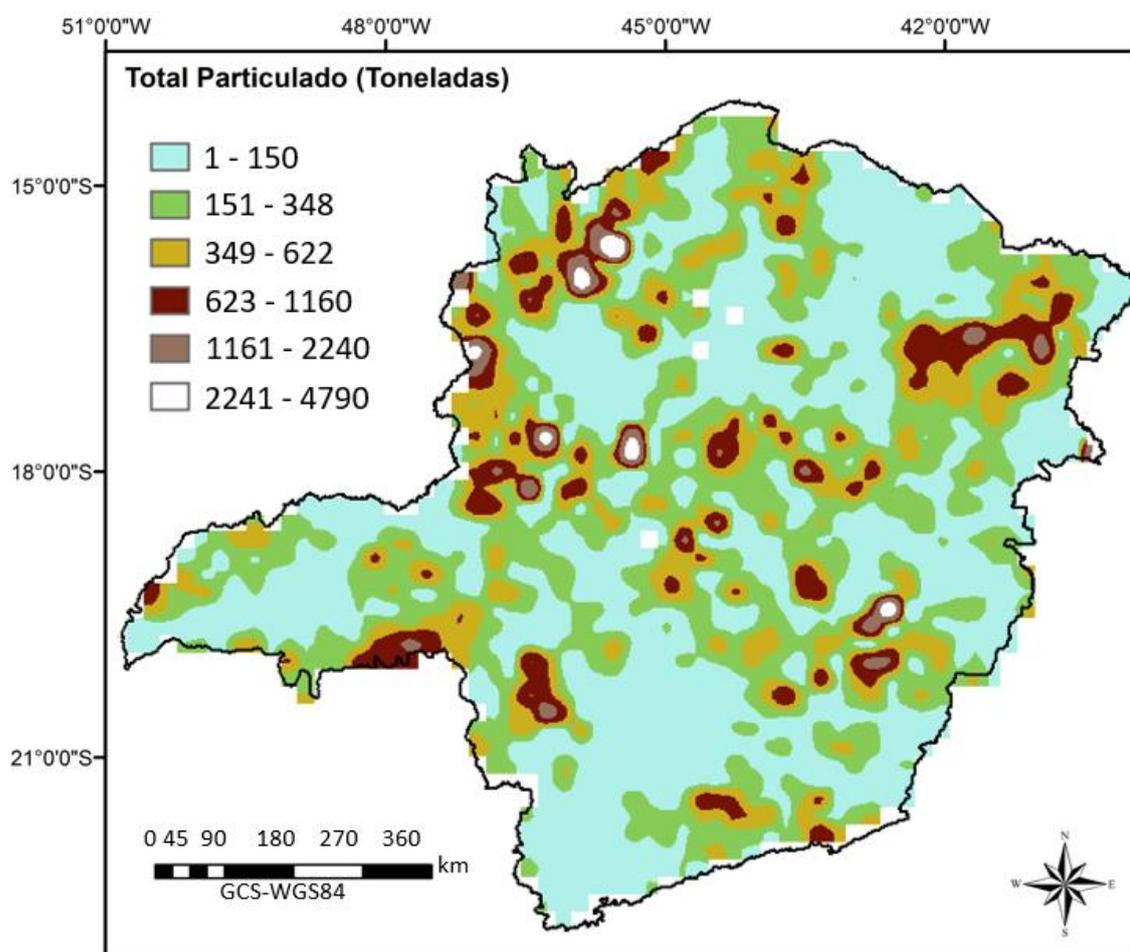
Figura 7: Média da precipitação para o ano de 2014 no Estado de Minas Gerais (a) e Anomalia da precipitação (2000-2015) no Estado de Minas Gerais (b)



A Figura 7b mostra o mapa da anomalia da precipitação para o ano de 2014. Percebe-se que o ano de 2014 foi extremamente seco e atípico, pois de uma forma geral ao comparar a média da precipitação de 2014 com a média de 15 anos nota-se que poucas áreas se mantiveram na média, sendo que na maioria do Estado de Minas Gerais a precipitação apresentou anomalias negativas, principalmente na região central e no extremo sul do Estado, com uma taxa negativa de até 831 mm quando comparado com a média de 2000 a 2015.

A Figura 8 mostra o mapa do total particulado que foi emitido pelas queimadas na área de estudo no ano de 2014, obtido a partir da FRP. As áreas em tons brancos indicam locais que apresentaram a maior FRP, denotando um maior consumo de biomassa e severidade do fogo nesses locais. Ainda, indica também uma maior taxa de emissão de gases traços e aerossóis para a atmosfera, sendo que nesses locais o total particulado atinge cerca de 4790 toneladas de emissão, principalmente em locais presentes na região noroeste e sudeste.

Figura 8: Mapa do total particulado (em toneladas) emitido pelas queimadas no Estado de Minas Gerais no ano de 2014



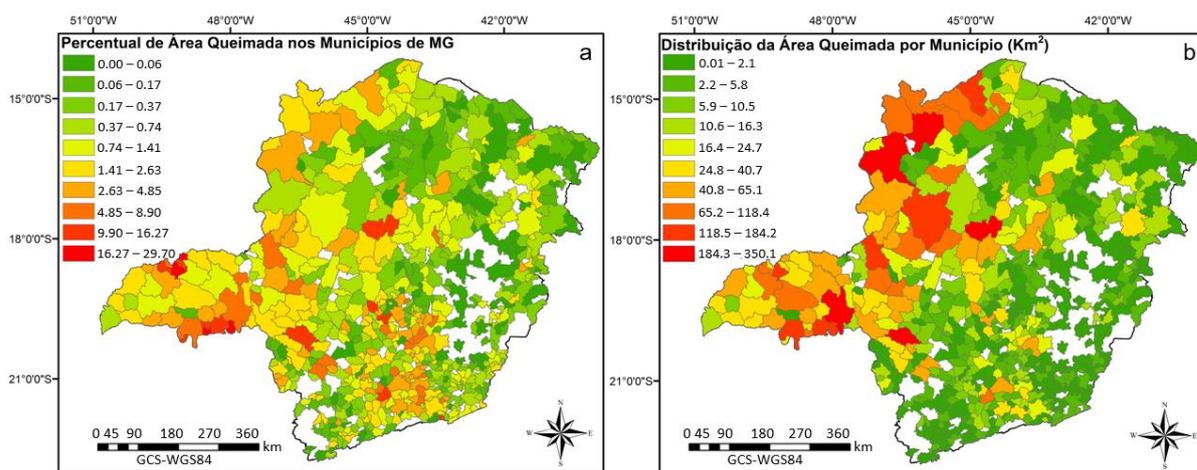
Percebe-se que nem sempre os locais que apresentam maior FRP coincidem com os locais que apresentam queimadas, explicado pelo fato de que os produtos de focos utilizados para estimar a FRP e, conseqüentemente, o total particulado, provêm de dados que possuem detecção diária e, no caso dos sensores SEVIRI e WFABBA, detecção a cada 15 minutos. Assim, como os dados do

sensor OLI possuem resolução temporal de 16 dias, e aliado a isso, muitas imagens não são aptas a serem utilizadas devido à alta taxa de cobertura de nuvens.

Para analisar a ocorrência das queimadas com os fatores antrópicos no Estado de Minas Gerais, as mesmas foram cruzadas com os *shapes* dos Municípios, como podem ser visualizadas na Figura 9, que mostra o percentual de área queimada por tamanho dos Municípios do Estado de Minas Gerais (a) e a distribuição geral das queimadas (em km²) nos Municípios (b). Desta forma, percebe-se que Água Comprida, Planura e Canápolis foram os locais que apresentaram os maiores percentuais de área queimada de acordo com o tamanho do Município, representadas pela cor vermelha mais forte no mapa, com 29,70%, 26,22% e 20,49%, respectivamente, localizados na região do Triângulo Mineiro (Figura 9a).

Ao analisar o tamanho total das queimadas nos Municípios mineiros, percebe-se que as mesmas ocorreram em maioria nos Municípios de Lassance, localizado na região Norte (350,07 Km²), São Roque de Minas na região Oeste (275,71 Km²), Uberaba no Triângulo Mineiro (241,63 Km²), assim como Arinos e Unaí na Região Noroeste, com 225,83 Km² e 223,49 Km², respectivamente, como pode ser visualizado na Figura 9b.

Figura 9: Percentual de áreas queimadas por tamanho dos Municípios do Estado de Minas Gerais no ano de 2014 (a) e Distribuição total das áreas queimadas ocorridas nos Municípios do Estado de Minas Gerais no ano de 2014 (b)



A Tabela 1 mostra dados do censo agropecuário obtido do IBGE (2014) para os Municípios com destaque em áreas queimadas. Percebe-se que o Município de Lassance, que apresenta o maior número de queimadas no ano de 2014 se destaca pela silvicultura, com 29.000 hectares de eucaliptos plantados. O Município de Uberaba, terceiro na ocorrência de queimadas, apresenta o maior número de produtos plantados na lavoura permanente, com 48.681 toneladas, com destaque para a comercialização da laranja e tangerina. Ainda, pode-se destacar o Município de Unaí, que apresentou o menor número de queimadas entre os cinco analisados, mas se destaca pela pecuária, com 686.040 cabeças de animais, além de ter apresentado apenas no ano de 2014 quase um milhão e meio de toneladas de produtos plantados, utilizando para estes fins 262.390 hectares de áreas. Dentre os produtos plantados destaca-se a cana-de-açúcar, com 595.800 toneladas.

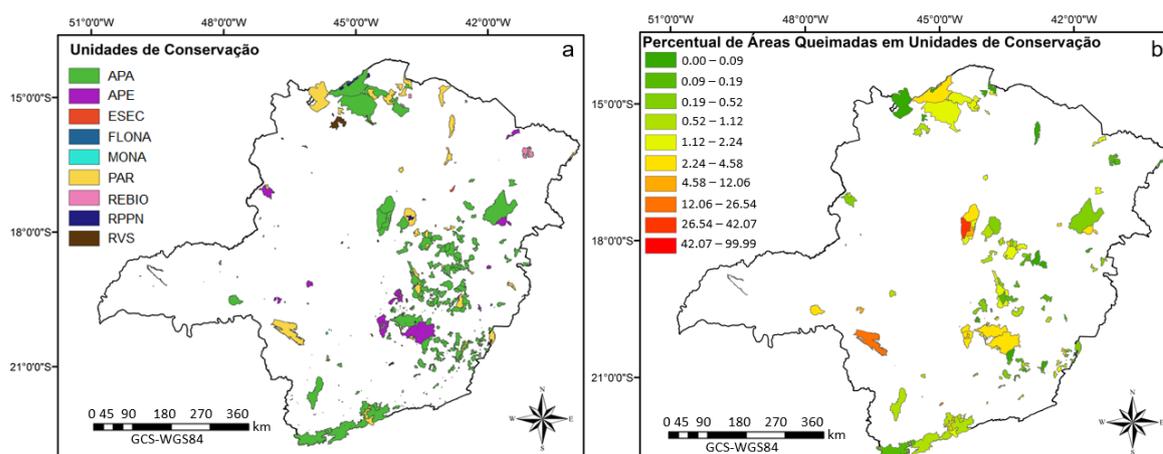
Tabela 1: Dados Agropecuários dos Municípios Mineiros com destaque em áreas queimadas para o ano de 2014

UCT	Lassance	São Roque de Minas	Uberaba	Arinos	Unai
Lavoura Permanente (toneladas)	9.354	9.998	48.681	x	18.405
Lavoura Temporária (toneladas)	13.016	39.747	23.061	50.858	1.457,823
Pecuária (cabeças)	96.323	140.259	59.504	210.185	686.040
Silvicultura (eucaliptos em hectares)	29.000	3.500	1.912	5.900	4.670
Área total utilizada (hectares)	31.020	14.664	6.102	22.120	262.390

Fonte: IBGE (2014)

A Figura 10a mostra as Unidades de Conservação (UC) presentes no Estado de Minas Gerais, compostas por Áreas de Proteção Ambiental (APA), Áreas de Proteção Especial (APE), Estação Ecológica (ESEC), Floresta Estadual (FLONA), Monumento Natural (MONA), Parque Estadual (PAR), Reserva Biológica (REBIO), Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) e Refúgio da Vida Silvestre (RVS). As UCs foram utilizadas para a tabulação cruzada com os dados de áreas queimadas.

Figura 10: Unidades de Conservação do Estado de Minas Gerais (a) e Percentual de Área Queimada em Unidades de Conservação do Estado de Minas Gerais no ano de 2014 (b)



A Figura 10b mostra as Unidades de Conservação que apresentaram os maiores percentuais de áreas queimadas, e a Tabela 2 apresenta maiores detalhes sobre essas áreas, onde foram selecionados as Unidades de Conservação que apresentaram as maiores ocorrências de queimadas, acima de 15% da área total. Destacam-se as queimadas ocorridas em locais na qual o uso é de

Proteção Integral. Percebe-se em primeiro lugar o Monumento Natural, composto pela UC denominada Mãe D'Água no Município de Brumadinho, apresentando 72,36% de sua área queimada, seguido da Reserva Biológica Campos Rupestres de Moeda Sul no Município de Moeda, com 59,41% da área total queimada. A terceira UC de proteção integral que apresenta as maiores ocorrências de queimadas é composta pelo Monumento Natural Serra da Moeda nos Municípios de Moeda e Itabirito, com 42,07% do total, seguida da UC denominada de Arêdes, Estação Ecológica localizada no Município de Itabirito com 39,46% de área queimada.

Ainda, o Monumento Natural denominado Gruta do Rei do Mato em Sete Lagoas, apresentou 26,54% da área total queimada, seguido do Parque Estadual São Francisco de Assis em Varginha com 21,04% de sua área queimada. O Parque Estadual Serra da Canastra apresentou 16,96% do total de sua área queimada, abrangendo diversos municípios, além da Serra do Rola Moça em Belo Horizonte, Brumadinho, Ibirité e Nova Lima e pela Fazenda Lagoa do Nado em Belo Horizonte, ambos com 16,38% e 15,53% de suas áreas totais queimadas, respectivamente.

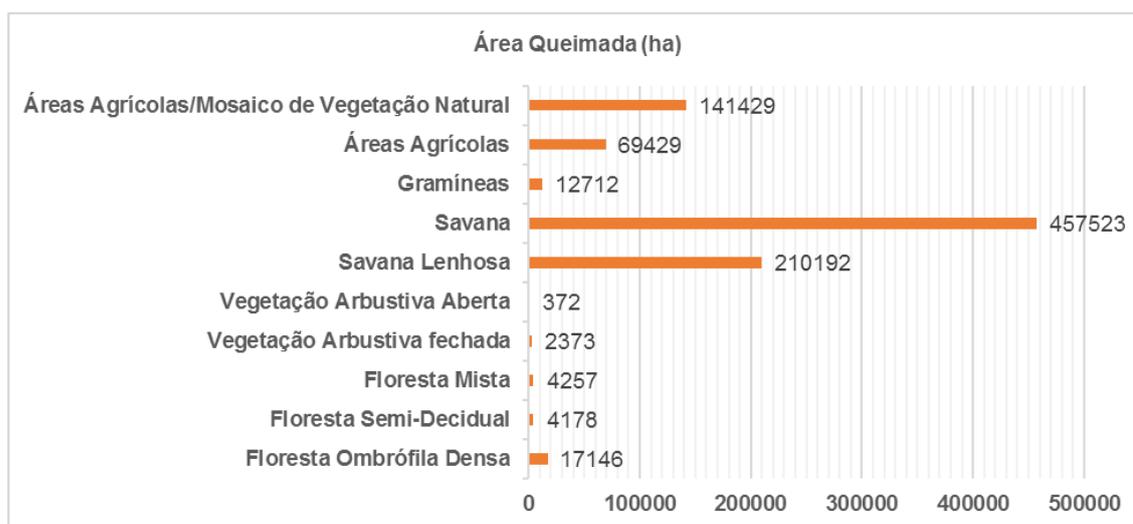
Tabela 2: Percentual de Área Queimada em Unidades de Conservação do Estado de Minas Gerais no ano de 2014

Tipo	Uso	UC	Município	(%)
FLONA	Uso Sustentável	São Judas Tadeu	Betim	86,70
MONA	Proteção Integral	Mãe D'Água	Brumadinho	72,36
APE	Uso Sustentável	Catarina	Belo Horizonte / Nova Lima	60,44
REBIO	Proteção Integral	Campos Rupestres de Moeda Sul	Moeda	59,41
RPPN	Uso Sustentável	Reserva Lagoa da Capa	Coromandel	58,79
RPPN	Uso Sustentável	Herculano	Itaúna	56,83
MONA	Proteção Integral	Serra da Moeda	Moeda e Itabirito	42,07
ESEC	Proteção Integral	de Arêdes	Itabirito	39,46
APA	Uso Sustentável	Serra do Cabral Lassance	Lassance	39,45
APA	Uso Sustentável	Morro da Torre	Carangola	36,14
MONA	Proteção Integral	Gruta Rei do Mato	Sete lagoas	26,54
PAR	Proteção Integral	São Francisco de Assis	Varginha	21,04
RPPN	Uso Sustentável	Fazenda Carneiro	Lagamar \ Vazante	20,74
APE	Uso Sustentável	Barreiro	Belo Horizonte	19,20
PAR	Proteção Integral	Serra da Canastra	Delfinópolis / Sacramento / São Roque de Minas / Capitólio / São João Batista do Glória / Vargem	16,96
PAR	Proteção Integral	Serra do Rola Moça	Belo Horizonte / Brumadinho / Ibirité / Nova Lima	16,38
PAR	Proteção Integral	Fazenda Lagoa do Nado	Belo Horizonte	15,53

A Figura 11 mostra a ocorrência da queimada em cada tipo de UCT na área de estudo. Como pode-se perceber, as queimadas ocorrem em maioria no bioma Cerrado em áreas de Savana, abrangendo 457.523 hectares, seguidos da classe Savana Lenhosa, com 210.192 hectares de área queimada. A terceira classe que apresenta as maiores queimadas está representada pelas Áreas Agrícolas/Mosaico de Vegetação Natural, com 141.429 hectares de queimadas e pela classe Áreas Agrícolas, com 69.429 hectares de áreas queimadas. A classe da Floresta Ombrófila Densa, inserida

no bioma Mata Atlântica apresentou 17.146 hectares de queimadas e a classe Gramíneas foram substituídas pelas queimadas em 12.712 hectares. Desta forma, percebe-se que as queimadas são ocasionadas em áreas com algum tipo de uso prévio, como as áreas agrícolas, provavelmente com a finalidade de limpeza e manutenção das mesmas, e principalmente para a abertura de novas áreas destinadas a implantação de gado e agricultura, sendo as áreas de savana o tipo principal desmatado, com 667.715 hectares desse tipo de vegetação do Cerrado substituídos pelas queimadas apenas no ano de 2014 na área de estudo.

Figura 11: Área Queimada no Uso e Cobertura da Terra do Estado de Minas Gerais no ano de 2014



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ocupação de Minas Gerais apresenta um intenso processo de exploração do uso e cobertura da terra com o passar dos anos, principalmente com o uso intensivo da agricultura, pecuária e monoculturas. Desta forma, as queimadas são muito utilizadas para estes fins, tanto para a abertura de novas áreas quanto para a limpeza e manutenção das mesmas, sendo que apenas para o ano de 2014, 9.282 km² de queimadas foram identificadas, abrangendo 4,05% do total da área do Estado, localizadas principalmente na região oeste, que engloba a área do Triângulo Mineiro, norte e noroeste. Nestas regiões geográficas se localizam os Municípios que mais apresentaram queimadas neste ano, como Lassance, São Roque de Minas, Uberaba, Arinos e Unaí, que juntos abrangem quase dois milhões de cabeças de animais na pecuária, quase 45.000 hectares de eucaliptos e aproximadamente um milhão e setecentos mil toneladas de produtos plantados, totalizando aproximadamente 336.300 hectares de áreas utilizadas.

Neste contexto, percebe-se que o tipo de uso que foi substituído em maioria pelas queimadas foram as áreas de savana e savana lenhosa, seguidas das áreas agrícolas, sendo o bioma Cerrado o tipo principal desmatado. Assim, os remanescentes do Cerrado atualmente encontram-se fragmentados e esparsos na área de estudo, assim como a Mata Atlântica, corroborado pelo fato de que Minas Gerais lidera o ranking de supressão desse bioma nos últimos dez anos.

Outro fator que pode ter colaborado para a intensa ocorrência das queimadas nesse ano foram os índices de precipitação abaixo da média dos últimos 15 anos, que foi extremamente seco e atípico, sendo que na maioria do Estado de Minas Gerais a precipitação apresentou anomalias negativas, e em relação à média total anual, algumas áreas apresentaram apenas 500 mm de precipitação, coincidindo com as áreas em que o vigor vegetativo foi mediano e baixo e com as áreas onde a condição da vegetação era extremamente seca, seca e normal. Assim, percebe-se que além dos

impactos biológicos já mencionados, as queimadas liberaram para a atmosfera cerca de 4.790 toneladas de total particulado, fatores que modificam a disponibilidade de energia necessários para a realização dos processos atmosféricos, podendo ocasionar a alteração do clima local, regional e global.

Desta forma, foi constatado que a precipitação é o fator principal que influencia na condição da vegetação, e que uma vegetação mais seca e suscetível ao fogo não necessariamente influencia na ocorrência das queimadas, e sim o fator de ordem antrópica a partir da modificação do uso e cobertura da terra com o desmatamento e manutenção de áreas para o uso agropecuário, corroborando que o uso intensivo da cobertura da terra provocam diversos impactos tanto na superfície quanto na atmosfera, tornando importante a continuação do estudo para analisar os impactos em uma escala temporal maior.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (processo 1511040), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo 162898/2015-0) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (processo APQ-01698-14) pelos auxílios.

REFERÊNCIAS

- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 4, n. 15, p. 955-966, 2001. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>
- AMDA - Associação Mineira de Defesa do Ambiente. Mata Seca está sob ameaça. **Ambiente Hoje**, v. 120, p. 24, 2005.
- ANTUNES, F.Z. Caracterização climática do estado de Minas Gerais: climatologia agrícola. **Informe Agropecuário**, v. 12, p. 9-13, 1986.
- BELWARD, A.S.; ESTES, J.E.; KILNE, K.D. The IGBP-DIS global 1- km land-cover data set DISCover: a project overview. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, p. 1013-1020, 1999.
- BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; WERF, G. R. V.; PYNE, S. J. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, p. 481-484, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- BUSTAMANTE, M. M. C.; ROITMAN, I.; AIDE, T. M.; ALENCAR, A.; ANDERSON, L.; ARAGÃO, L.; ASNER, G. P.; BARLOW, J.; BERENGUER, E.; CHAMBERS, J.; COSTA, M. H.; FANIN, T.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, J. N.; KELLER, M.; MAGNUSSON, W. E.; MORALES, L.; MORTON, D.; OMETTO, J. P. H. B.; PALACE, M.; PERES, C.; SILVÉRIO, D.; TRUMBORE, S.; VIEIRA, I. C. G. Towards an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity, **Global Change Biology**, v. 1, p. 92-109, 2016. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>
- CARDOSO, M.; NOBRE, C.; SAMPAIO, G.; HIROTA, M.; VALERIANO, D.; CÂMARA, G. Long-term potential for tropical-forest degradation due to deforestation and fires in the Brazilian Amazon. **Biologia (Bratislava)**, v. 64, p. 433-437, 2009. <https://doi.org/10.2478/s11756-009-0076-9>
- COCHRANE, M.A.; RYAN, K.C. Fire and fire ecology: Concepts and principles. In: COCHRANE, M.A. **Tropical Fire Ecology, Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics**. Chichester: Springer, 2009. p. 60-97. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8_2
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite TRMM Na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 93-99, 2007.

COURA, S. M. C. **Mapeamento de vegetação do estado de Minas Gerais utilizando dados MODIS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - São José dos Campos: INPE. 2006.

CRUTZEN, P.J.; ANDREAE, M.O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, p. 1669-1678, 1990. <https://doi.org/10.1126/science.250.4988.1669>

FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I. Biomass and greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, n. 258, p. 1968-1978, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.042>

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, P. L. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G. A.; RECUERO, F.S. Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics**, n. 5, p. 135-167, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10652-005-0243-7>

DRUMMOND, G. M.; MARTINS, C. S.; MACHADO, A. B. M.; SEBAIO, F. A.; ANTONINI, Y. **Biodiversidade em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2005.

GUIMARÃES, D. P.; REIS, R. J.; LANDAU, E. C. Índices pluviométricos em Minas Gerais. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. 2014. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 de março de 2017

ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857328>

ICHOKU, C.; ELLISON, L. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, p. 6643-6667, 2014. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6643-2014>

IEF - Instituto Estadual de Florestas. Minas Gerais: **Cobertura vegetal de Minas Gerais**. 2012. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/florestas>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2016.

JIAO, W.; ZHANG, L.; CHANG, Q.; FU, D.; CEN, Y.; TONG, Q. Evaluating an enhanced Vegetation Condition Index (VCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental United States. **Remote Sensing**, n. 8, 224, 2016.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MRISSETTE, J.; ROY, D.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire product. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 244-262, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)

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, 1996. p. 685-696.

KOGAN, F.N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 76, p. 655-668, 1995. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; PIRRE, M.; MARÉCAL, V.; RODRIGUES, L. F.; PANETTA, J.; ALONSO, M. F.; ROSÁRIO, N. E.; MOREIRA, D. S.; GÁCITA, M. S.; ARTETA, J.; FONSECA, R.; STOCKLER, R.; KATSURAYAMA, D. M.; FAZENDA, A.; BELA, M. The Chemistry CATT-BRAMS model (CATT-BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research, **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 1389-1405, 2013. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1389-2013>

MAO, Y. H.; LI, Q. B.; CHEN, D.; ZHANG, L.; HAO, W.-M.; LIOU, K.-N. Top-down estimates of biomass burning emissions of black carbon in the Western United States, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, p. 7195-7211, 2014. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7195-2014>

MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; SALAZAR, L. F. Regional climate change cenarios in South America in the Late XXI Century: projections and expected impacts. **Nova Acta Leopoldina**, n. 112, p. 251-265, 2010.

MORAES, E. C.; FRANCHITO, S.H.; BRAHMANANDA RAO, V. Effects of biomass burning in Amazonia on climate: A numerical experiment with a statistical-dynamical model. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D05109, p. 1-12, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JD003800>

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, p. 6388-6397, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.013>

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with. In: **Earth Resources Technology Satellite**. v. 1, Washington: [s.n.], 1974. p. 309-317.

SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Lavras: UFL. 2009.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARESFILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, n. 34, p. 1-7, 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991. <https://doi.org/10.1109/36.103288>

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO JR., A. F. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 6, p. 3423-3441, 2006. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3423-2006>

VERAVERBEKE, S.; STRAVOS, E. N.; HOOK, S. J. Assessing fire severity using imaging spectroscopy data from the Airborne Visible/ Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and comparison with multispectral capabilities, **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 153-163, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.019>

WOOSTER, M. J.; ZHUKOV, B.; OERTEL, D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 83-107, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00070-1)

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. D21111, 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JD006318>

Recebido em: 02/05/2017
Aceito para publicação em: 23/04/2018